МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

В. В. ЕНЮТИН и С. М. НИКУЛИН

Спусковые устройства



1957

К ЧИТАТЕЛЯМ

Выпуски массовой радиобиблиотеки служат важному делу пропаганды радиотехнических знаний среди широких слоев населения нашей страны и способствуют развитию радиолюбительства. В свете этих задач большое значение имеет привлечение радиолюбительской общественности к критике каждой вышедшей книги и брошюры.

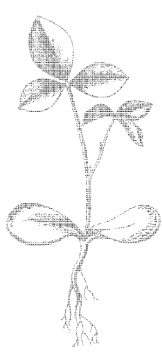
Редакция массовой радиобиблиотеки обращается к читателям данной книги с просьбой прислать свои отзывы, пожелания и замечания вместе с краткими сообщениями о своем образовании, профессии, возрасте и радиолюбительском опыте по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, д. 10. Редакция массовой радиобиблиотеки Госэнергоиздата.

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 272

В. В. ЕНЮТИН и С. М. НИКУЛИН

СПУСКОВЫЕ УСТРОЙСТВА





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1957 ЛЕНИНГРАД

В брошюре изложены принцип действия и технический расчет некоторых вариантов спусковых устройств с двумя состояниями устойчивого равновесия. Приводятся также практические схемы спусковых устройств.

Брошюра предназначена для подготовленного радиолюбителя.

Авторы:
Енютин Вячеслав Вячеславович
и Никулин Станислав Михайлович

СПУСКОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Редактор *Ю. Н. Пленкин* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 22/II 1957 г. Подписано к печати 29/V 1957 г.
Т 04587. Бумага $84 \times 108^1/_{32}$ 4,1 печ. л. Уч.-изд. л. 4,7.
Тираж 30 000 экз. Цена 1 р. 90 к. Заказ 126

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Последнее десятилетие характеризуется широким внедрением в различные области техники электрических приборов, работающих в импульсных режимах. Среди большого разнообразия этих так называемых импульсных устройств значительное распространение получили устройства с одним, двумя или несколькими состояниями устойчивого равновесия.

В настоящей брошюре рассмотрены спусковые устройства с двумя состояниями устойчивого равновесия, которые благодаря разнообразию решаемых задач имеют большое прикладное значение для различных областей науки и техники. Спусковые устройства с двумя состояниями устойчивого равновесия относятся к классу генераторов импульсов с внешним запуском, которые еще называют формирующими устройствами. Они известны в литературе под различными названиями: «реостатный триггер», «курковая схема», «перекидное устройство», «реостатная спусковая схема», «схема да-нет», «полупериодный мультивибратор» и др.

Особое распространение эти устройства получили в счетно-решающих приборах дискретного счета (счетные цепи которых в основном состоят из спусковых ячеек, связанных между собой определенным образом), в пересчетных приборах, применяемых для счета числа импульсов, для целей формирования и восстановления импульсов и в ряде других случаев. В радиолюбительской практике спусковые устройства находят применение не только для создания простейших счетно-решающих узлов, но и для решения задач схемного порядка.

Объем настоящей брошюры позволяет рассмотреть устройства, получившие наибольшее распространение, а также те, которые могут быть использованы в радиолюбительской практике. К ним мы отнесли спусковые устройства, построенные на газонаполненных лампах с холодным катодом, на электронных лампах и на полупроводниковых триодах.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

1. ОСНОВНОЕ СВОЙСТВО И ТИПОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Основным свойством спускового устройства с двумя состояниями устойчивого равновесия является способность неограниченно долго сохранять одно из состояний электрического равновесия и скачком переходить к другому состоянию устойчивого равновесия всякий раз, когда воздействующий на его вход сигнал запуска переходит через некоторое значение напряжения, называемое пороговым.

Это свойство иллюстрируется типовой характеристикой (рис. 1,*а*) спускового устройства, показывающей зависимость выходного напряжения $u_{вых}$ от напряжения сигнала запуска $u_{зап}$, воздействующего на его вход. Верхняя и нижняя ветви этой характеристики соответствуют состояниям устойчивого равновесия, в пределах которого всякое изменение сигнала запуска не вызывает скачкообразного изменения выходного напряжения. Наклонная ветвь характеристики, изображенная на рис. 1,*а* пунктиром, соответствует состоянию неустойчивого равновесия, в котором устройство находиться не может. Точки *1* и *2*, разделяющие устойчивые и неустойчивые ветви характеристики, называют пороговыми точками, а значения напряжений сигнала запуска, соответствующие пороговым точкам, называют пороговыми напряжениями $U_{пор1}$ и $U_{пор2}$ или напряжениями срабатывания устройства.

Под выражением «изменение скачком» (тока или напряжения) понимается такое изменение, которое происходит лавинообразно, т. е. развивается с большой скоростью, за счет внутренних свойств устройства. Сигнал запуска играет роль внешней силы, приводящей в действие определенные связи спускового устройства. Действие этих связей должно быть таким, чтобы при превышении сигналом запуска поро-

гового напряжения изменения токов и напряжений в устройстве привели к процессу нарастания этих изменений. При выполнении этого условия состояние равновесия становится неустойчивым и в устройстве возникает процесс лавинообразного изменения токов и напряжений, приводящий к быстрому (скачкообразному) изменению выходного напряжения.

Сигнал запуска как бы спускает «курок механизма», вызывающего срабатывание устройства. Это основное свой-

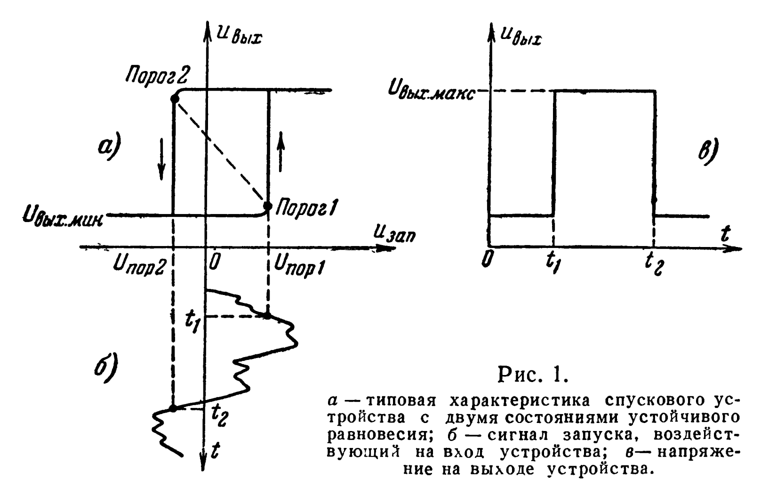


Рис. 1.
а — типовая характеристика спускового устройства с двумя состояниями устойчивого равновесия; *б* — сигнал запуска, воздействующий на вход устройства; *в* — напряжение на выходе устройства.

ство таких устройств и отражается в их названии спусковые устройства.

Под срабатыванием устройства в дальнейшем будем понимать скачкообразное изменение состояния равновесия устройства.

Когда сигнал запуска (рис. 1,*б*), который может быть любой формы, переходит пороговое значение и рабочая точка выходит за пределы ветви характеристики, соответствующей состоянию устойчивого равновесия, в устройстве развивается лавинообразный процесс изменения токов и напряжений, в результате которого в моменты времени t_1 и t_2 устройство скачком переходит от одного состояния устойчивого равновесия к другому. Напряжение на выходе скачком изменяется от значения $U_{вых.мин}$ до $U_{вых.макс}$ в момент времени t_1 и снова до значения $U_{вых.мин}$ в момент времени t_2. Независимо от формы сигнала запуска выходное напряжение имеет форму импульса длительностью,

определяемой разностью времен срабатывания устройства (рис. 1,*в*). Крутизна фронта и среза этого импульса не зависит от формы сигнала запуска и определяется временем установления выходного напряжения после срабатывания устройства.

Характеристику, изображенную на рис. 1,*а*, обычно называют динамической характеристикой спускового устройства. Она имеет гистерезисный характер, так как срабатывание устройства происходит при разных уровнях сигнала

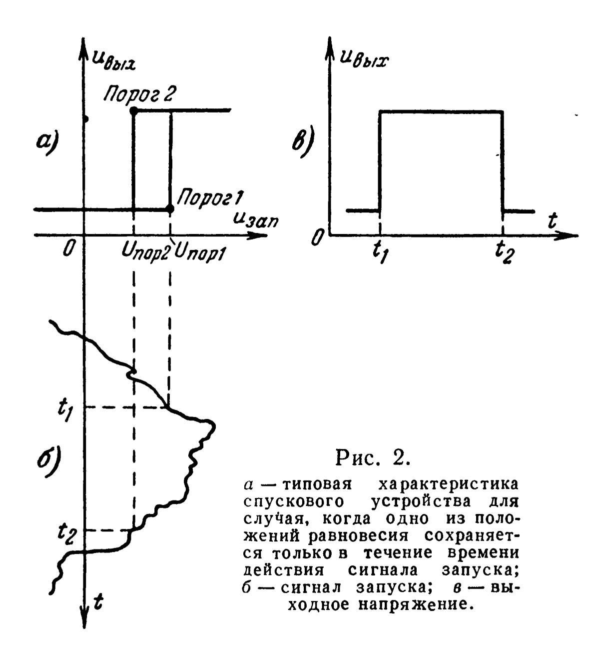


Рис. 2.
а — типовая характеристика спускового устройства для случая, когда одно из положений равновесия сохраняется только в течение времени действия сигнала запуска; *б* — сигнал запуска; *в* — выходное напряжение.

запуска. Разницу между пороговыми значениями напряжений $U_{\Gamma} = U_{пор1} - U_{опр2}$ обычно называют напряжением гистерезиса. Если ось ординат динамической характеристики не выходит за пределы области гистерезиса, то любое из двух состояний устойчивого равновесия в отсутствии сигнала запуска может сохраняться неограниченно долго.

На практике встречается и такой режим работы спусковых устройств, когда ось ординат динамической характеристики не пересекает области гистерезиса. Как видно из рис. 2, в этом случае во втором состоянии равновесия

устройство может оставаться только в течение времени действия сигнала запуска.

Из теории известно, что если характеристика электрического прибора, представляющая собой зависимость тока i, протекающего через прибор, от напряжения u, приложенного к входу этого прибора, имеет падающий участок (участок *1-2* на рис. 3), то этот участок соответствует состояниям неустойчивого равновесия. Падающий участок характеристики соответствует такому режиму работы, при котором прибор представляет как бы отрицательное сопротивление, т. е. увеличение напряжения, приложенного к входу прибора, вызывает уменьшение тока, протекающего через него, и наоборот.

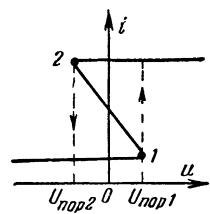


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика электрических приборов, пригодных для использования в спусковом режиме работы.

При воздействии на вход такого прибора сигнала запуска всякий раз, когда напряжение его будет переходить пороговые значения $U_{пор1}$ или $U_{пор2}$, состояние равновесия окажется неустойчивым и ток i скачком изменится, в результате чего в приборе установится новое состояние равновесия. Включив в цепь такого прибора сопротивление, получим устройство, имеющее характеристику, подобную изображенной на рис. 1,*а*.

Любой электрический прибор, имеющий характеристику, подобную изображенной на рис. 3, может быть использован в качестве спускового устройства с двумя состояниями устойчивого равновесия.

К таким приборам относятся газонаполненные лампы с холодным катодом, газотроны, тиратроны, электронные лампы, работающие в динатронном и транзитронном режимах, термисторы и др.

Однако возможности использования перечисленных приборов в спусковых устройствах ограничены вследствие невозможности управления их характеристиками в широких пределах. Поэтому наибольшее распространение получили спусковые устройства, собранные по схеме усилителя, замкнутого в цепь положительной обратной связи, которые позволяют изменять их характеристики в широких диапазонах. Такие устройства строятся на электронных лампах, работающих в нормальных режимах, полупроводниковых триодах и магнитных усилителях.

2. СПУСКОВОЕ УСТРОЙСТВО НА НЕОНОВОЙ ЛАМПЕ

Простейшим прибором, пригодным для использования его в режиме спускового устройства, является неоновая лампа, схема включения которой показана на рис. 4. Зависимость тока $i_н$, протекающего через цепь, составленную из последовательно включенных сопротивлений R_1 и R_2 и неоновой лампы *Л*, от напряжения $u_н$, приложенного к ее

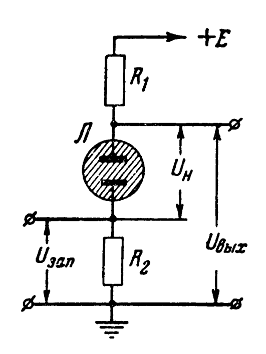


Рис. 4. Схема включения неоновой лампы, работающей как спусковое устройство.

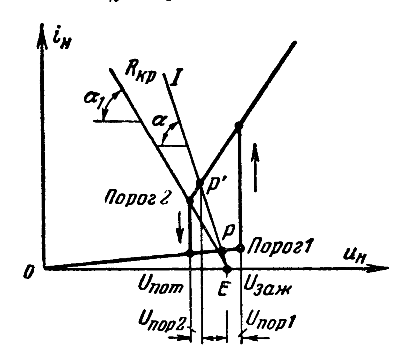


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика неоновой лампы и выбор режима ее работы.

электродам (вольт-амперная характеристика), приведена на рис. 5.

Спусковые свойства обусловлены здесь характером газового разряда, происходящего в неоновой лампе. При напряжениях на электродах лампы, меньших напряжения зажигания $U_{заж}$, разряд носит несамостоятельный характер и значение тока $i_н$ минимально. При значениях же напряжения $u_н$, превышающих величину $U_{заж}$ (точка *1*), в неоновой лампе лавинообразно развивается самостоятельный разряд и ток $i_н$ скачком увеличивается. Лампа «зажигается».

Дальнейшее увеличение напряжения или уменьшение его до величины, не меньшей напряжения потухания $U_{пот}$ (точка *2*), не будет вызывать скачкообразного изменения занятого состояния равновесия, хотя величина тока $i_н$ будет значительно изменяться. При уменьшении напряжения $u_н$ ниже значения $U_{пот}$ самостоятельный разряд прекратится и ток скачком уменьшится до значения, соответствующего несамостоятельному разряду. Лампа «погаснет».

Чтобы поставить неоновую лампу в режим работы спу-

скового устройства с двумя состояниями устойчивого равновесия, необходимо подобрать напряжение источника питания E и величину сопротивлений R_1 и R_2 таким образом, чтобы нагрузочная линия I (рис. 5) пересекала обе устойчивые ветви вольт-амперной характеристики. Это достигается выбором напряжения E в пределах $U_{пот} < E < U_{заж}$ и сопротивления нагрузки $(R_1 + R_2) < R_{кр}$, где $R_{кр} = \operatorname{ctg} \alpha_1$ — критическое сопротивление (α_1 — угол наклона линии,

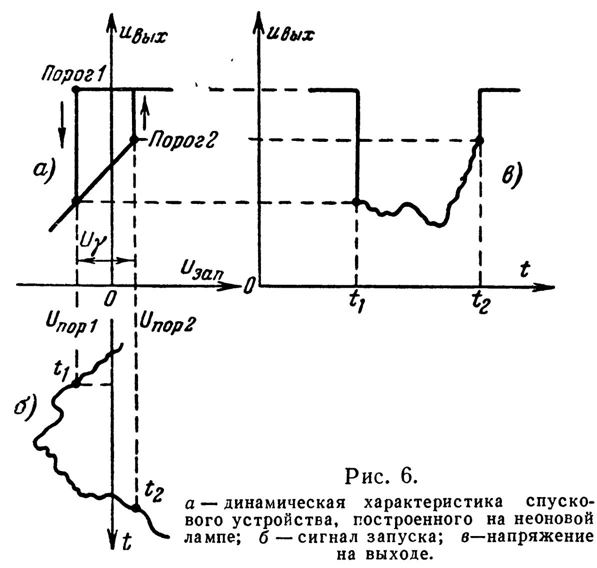


Рис. 6.
а — динамическая характеристика спускового устройства, построенного на неоновой лампе; *б* — сигнал запуска; *в* — напряжение на выходе.

проходящей через точку E и вторую пороговую точку характеристики). Состояние равновесия такого устройства будет определяться точками P и P' пересечения нагрузочной линии I с вольт-амперной характеристикой.

Динамическая характеристика такого устройства будет носить характер вольт-амперной характеристики (рис. 6,*а*). Сигнал запуска отрицательной полярности, подаваемый на сопротивление R_2, будет увеличивать напряжение $u_н$. В момент времени t_1, когда напряжение $u_н$, увеличиваясь, перейдет значение, равное напряжению зажигания $U_{заж}$ (рис. 5), или, что то же самое, когда напряжение сигнала запуска $u_{зап}$* перейдет значение $U_{пор1}$ (рис. 6,*а*), лампа «загорится»

* Во всех рассмотренных случаях считаем, что $u_{зап}$ есть напряжение сигнала запуска, измеренное на входных зажимах устройства.

и напряжение $u_н$ скачком упадет. Дальнейшее изменение напряжения сигнала запуска вызывает изменение тока $i_н$, и напряжение выхода повторяет закон изменения напряжения сигнала запуска. При увеличении напряжения сигнала запуска будет уменьшаться напряжение $u_н$. В момент времени t_2, когда напряжение $u_н$, уменьшаясь, перейдет значение, равное $U_{пот}$, или, что то же самое, когда напряжение $u_{зап}$ перейдет значение, равное $U_{пор2}$, лампа потухнет и напряжение выхода скачком увеличится до значения, равного E.

Рассмотренная схема спускового устройства весьма проста, но обладает существенными недостатками. Во-первых, напряжение $U_г$ гистерезиса для неоновых ламп невелико (порядка нескольких вольт) и стабильность пороговых точек невысока, поэтому трудно подобрать режим работы, обеспечивающий два состояния устойчивого равновесия. Во-вторых, напряжение на выходе такого устройства изменяется при изменении напряжения запуска в состоянии устойчивого равновесия, соответствующего «горящей» лампе. В результате этого форма напряжения на выходе устройства в общем случае отличается от прямоугольной (рис. 6,*в*).

3. СПУСКОВОЕ УСТРОЙСТВО НА ТИРАТРОНАХ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

От указанных недостатков свободно спусковое устройство, собранное на трехэлектродных неоновых лампах или, как их еще называют, тиратронах с холодным катодом.

Тиратрон с холодным катодом представляет собой, как и двухэлектродная неоновая лампа, систему с двумя состояниями устойчивого равновесия, но обладает тем преимуществом, что может быть зажжен при значительно меньших значениях напряжений сигнала запуска. Тиратрон с холодным катодом — это лампа тлеющего разряда, в которой при помощи вспомогательного электрода можно управлять моментом зажигания разряда между основными электродами. Третий, дополнительный электрод обычно называется зажигающим или стартовым. Он служит для возбуждения слабого разряда между ним и катодом. Этот разряд вызывает ионизацию газа и облегчает зажигание разряда между анодом и катодом основной цепи. Зажигающий электрод

определяет момент зажигания, после чего его управляющие свойства теряются. Для того чтобы погасить тиратрон, требуется понизить потенциал его анода ниже потенциала гашения.

Схема спускового устройства, построенного на тиратронах с холодным катодом, представлена на рис. 7,*а*. На рис. 7,*б* даны временные диаграммы напряжений на анодах тиратронов при воздействии импульсов запуска на вход. Устройство работает следующим образом.

Допустим, что вначале лампа $Л_1$ погашена, а $Л_2$ горит. Первый сигнал запуска положительной полярности зажжет

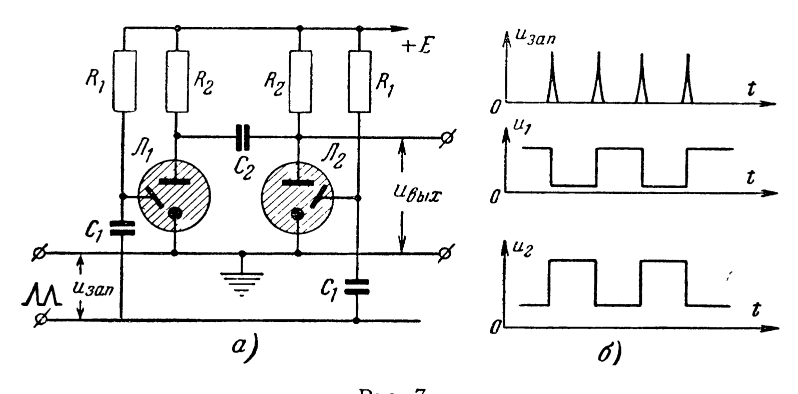


Рис. 7.

а — схема спускового устройства на тиратронах с холодным катодом;
б — временные диаграммы напряжений на анодах тиратронов.

лампу $Л_1$. Падение напряжения на сопротивлении R_2, вызванное скачкообразным увеличением тока этой лампы, передается через емкость связи C_2 на анод лампы $Л_2$ и гасит ее. Второй сигнал запуска положительной полярности зажжет вторую лампу и погасит первую и т. д. Каждый положительный сигнал запуска переводит устройство из одного состояния устойчивого равновесия в другое и обратно. При этом напряжение на выходе устройства будет изменяться от величины E до значения $E—IR_2$, где I — ток в горящей лампе.

Скачкообразное изменение тока в таком устройстве обусловлено лавинообразным характером развития самостоятельного (тлеющего) разряда в трехэлектродной неоновой лампе. В подобном устройстве можно использовать и обычные тиратроны с накаливаемым катодом.

4. СПУСКОВЫЕ УСТРОЙСТВА НА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ

Рассмотренные спусковые устройства просты, но они обладают относительно большим временем перехода из одного устойчивого состояния к другому и обратно. Это время складывается из времени запаздывания зажигания разряда, времени развития тока тлеющего разряда и времени деионизации и имеет минимальный предел 50—100 *мксек* после принятия всех мер к его понижению.

В целях получения более быстродействующих спусковых устройств с временем перехода из одного устойчивого состояния равновесия в другое и обратно порядка нескольких микросекунд или даже десятых долей микросекунд последние строят на электронных лампах и полупроводниковых триодах.

Спусковые устройства, построенные на электронных лампах, работающих в динатронном и транзитронном режимах, как и спусковые устройства, построенные на газонаполненных лампах, имеют тот недостаток, что управление их динамическими характеристиками в необходимых пределах невозможно. Вследствие этого широкое распространение получили схемы спусковых устройств, построенных на вакуумных лампах, работающих в обычных режимах.

В основу этих устройств берется обычный усилительный каскад на сопротивлениях, охваченный определенным образом рассчитанными связями, которые и обусловливают наличие падающего участка в характеристике устройства. Для того чтобы такой каскад обладал спусковыми свойствами, прежде всего необходимо получить в нем скачкообразное изменение тока всякий раз, когда напряжение сигнала запуска переходит определенные значения. Этого можно достичь путем применения такой обратной связи, при которой выполняются условия развития скачка, т. е. любое изменение тока каскада приводит в результате действия цепи обратной связи к нарастанию этого изменения. Такую обратную связь называют положительной.

Допустим, что входом устройства служит сеточная цепь усилительного каскада (рис. 8), а выходом — анодная цепь. Свяжем входную и выходную цепи между собой посредством какого-то, пока нам неизвестного, элемента, имеющего коэффициент передачи β. Под коэффициентом передачи будем понимать отношение напряжения, измеренного на выходе этого элемента, к напряжению на его входе, т. е. $\beta = \frac{u_{вых}}{u_1}$.

Усилительный каскад имеет коэффициент усиления по напряжению K. Предположим, что на сетке лампы усилительного каскада по каким-либо причинам возникает положительный «всплеск» напряжения, вызывающий кратковременное увеличение анодного тока лампы. Если при этом это первоначальное приращение анодного тока лампы вызовет за счет действия цепи обратной связи приращение напряжения на сетке лампы большее, чем то, которое вызвало это первоначальное приращение анодного тока, то анодный ток, а следовательно, и напряжение выхода будут изменяться в еще большей степени, в результате чего произойдет скачок напряжения и тока. Как видно, этот процесс возможен при выполнении условия $K\beta > 1$. Так как обычно в усилительных каскадах $K \gg 1$, то величина коэффициента передачи может быть и меньше единицы.

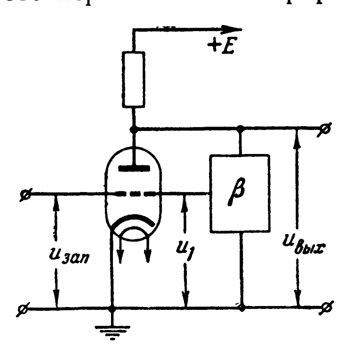


Рис. 8. Усилительный каскад с обратной анодно-сеточной связью через цепь, имеющую коэффициент передачи

$$\beta = \frac{u_{вых}}{u_1}.$$

Приведенные рассуждения будут справедливы также и в тех случаях, если за начальные изменения принимать приращение анодного тока или анодного напряжения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Во втором случае анодный ток будет не увеличиваться, а скачком уменьшаться.

Напряжение в анодной цепи лампы усилительного каскада будет в противофазе относительно напряжения на сетке, т. е. сдвинуто на угол, равный π. Поэтому цепь обратной связи должна обладать свойством поворачивать фазу анодного напряжения также на угол π, тогда усиленное сеточное напряжение передается снова на сетку в фазе с начальным напряжением, т. е. получается положительная обратная связь. При выполнении этих условий любое изменение сеточного напряжения будет усилено в $K\beta$ раз и снова подано на сетку в той же фазе. Это новое приращение сеточного напряжения снова усилится в $K\beta$ раз и снова придет на сетку в той же фазе и т. д. Вследствие малой инерционности усилительного каскада процесс изменения сеточного напряжения анодного тока и выходного напряже-

ния будет происходить лавинообразно с большой скоростью до тех пор, пока не нарушится условие $K\beta > 1$.

Элементом, поворачивающим фазу на угол π, может служить такой же усилительный каскад, если выходное напряжение подать на сетку лампы этого каскада, а анодную цепь его связать с сеткой первой лампы. Такой дополнительный усилительный каскад обеспечивает требуемую положительную связь в широком диапазоне частот.

Выясним, какой характер должны носить цепи, связывающие эти каскады. Во-первых, цепи связи должны иметь, по возможности, малые реактивные элементы (емкости или индуктивности), так как изменение энергетического состояния этих элементов в результате скачков токов и напряжений в устройстве может привести к автоколебательному режиму работы. Во-вторых, цепи связи должны после срабатывания устройства фиксировать те потенциалы на сетках лампы, при которых условие развития скачка не выполняется, т. е. выполняется неравенство $K\beta < 1$, представляющее собой условие устойчивого состояния равновесия. Это возможно, когда одна из ламп работает в режиме больших сеточных токов, за счет чего резко снижается коэффициент усиления каскада или когда одна из ламп заперта ($K\beta = 0$). Последний вариант наиболее целесообразен с практической точки зрения, так как позволяет использовать лампы в наиболее экономичных режимах.

Отмеченные требования легко выполняются, если в качестве цепей связи применять делители напряжений, составленные из активных сопротивлений (рис. 9). Изменение напряжения на сетке лампы $Л_1$ будет усилено в K_1 раз (где K_1 — коэффициент усиления по напряжению первого усилительного каскада) и сдвинуто по фазе на угол π в анодной цепи лампы $Л_1$. Изменение анодного напряжения лампы $Л_1$ разделится в $\frac{R_{c2}}{R_{c2} + R_1}$ раз и приложится к сетке лампы $Л_2$, затем усилится в K_2 раз (где K_2 — коэффициент усиления по напряжению второго усилительного каскада) и снова сдвинется на угол π вторым усилительным каскадом. В результате такого поворота общий сдвиг фазы окажется равным $\pi + \pi = 2\pi$, т. е. на аноде лампы $Л_2$ изменение напряжения будет происходить в фазе с изменением напряжения на сетке лампы $Л_1$. Это изменение напряжения разделится в $\frac{R_{c1}}{R_{c1} + R_2}$ раз и приложится к сетке лампы $Л_1$.

Коэффициент передачи цепи обратной связи

$$\beta = \frac{R_{c2}}{R_{c2}+R_1} \cdot K_2 \frac{R_{c1}}{R_{c1}+R_2}.$$

Если $K_2 \gg 1$, то легко получить $\beta > 1$. Чем значительнее неравенство $K\beta > 1$, тем быстрее развивается скачок в устройстве.

Подберем величины сопротивлений R_1, R_2, R_{c1} и R_{c2} цепей связи таким образом, чтобы при одной отпертой лампе другая лампа была заперта. Это условие возможно осуществить путем введения отрицательного смещающего напряжения $-E_c$ (рис. 9). Потенциал анода отпертой лампы

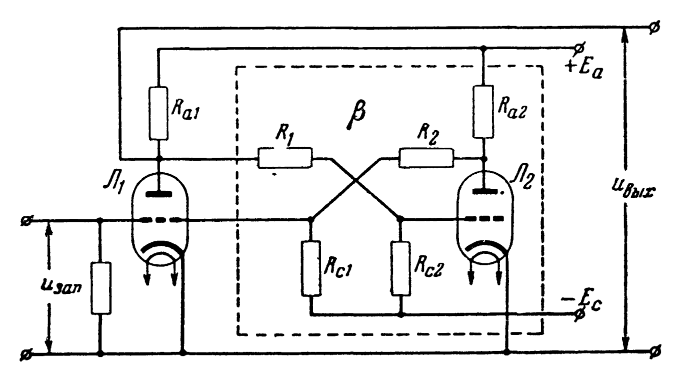


Рис. 9. Структура анодно-сеточной цепи обратной связи усилительного каскада.

ниже потенциала анода запертой на величину падения напряжения на анодном сопротивлении, вызванного протеканием анодного тока отпертой лампы. Это обстоятельство легко позволяет подобрать такое соотношение сопротивлений цепей связи и величину напряжения $-E_c$, при которых отпертая лампа надежно запирает лампу противоположного плеча, а запертая лампа фиксирует лампу противоположного плеча в отпертом состоянии.

Положим, в первый момент времени после включения обе лампы будут отперты. Но такое состояние устройства неустойчиво. В каждой электрической системе в любой момент времени действуют электрические «толчки» токов и напряжений, вызванные флуктуациями, нестабильностью источников питания, различными наводками и т. д. В ре-

зультате этих причин в устройстве неизбежно возникают процессы, приводящие к отклонению от состояния равновесия. В случае устойчивого равновесия действие этих причин приведет лишь к незначительному изменению в некоторых пределах токов и напряжений в устройстве около своих равновесных значений. В случае же состояния неустойчивого равновесия эти отклонения приведут к уходу значений токов и напряжений в устройстве от равновесных. к одному из устойчивых состояний равновесия.

Покажем качественно, что при выполнении условия $K\beta > 1$ устройство находится в состоянии неустойчивого равновесия и обязательно должно перейти к одному из состояний устойчивого равновесия. Допустим, что в силу каких-либо из отмеченных выше причин потенциал сетки первой лампы (рис. 9) уменьшится. Это приведет к уменьшению ее анодного тока и к увеличению потенциала анода за счет уменьшения падения напряжения на анодном сопротивлении. Увеличение потенциала анода первой лампы передастся на сетку второй лампы и вызовет увеличение ее анодного тока, что приведет к уменьшению потенциала ее анода. Уменьшение же потенциала анода второй лампы вызовет уменьшение потенциала сетки первой лампы. При $K_1\beta > 1$ это уменьшение потенциала сетки первой лампы будет больше первоначального, так как усилится в $K_1\beta$ раз.

Новое уменьшение потенциала сетки первой лампы приведет к еще большему уменьшению ее анодного тока, к еще большему возрастанию ее анодного потенциала и потенциала сетки второй лампы, к еще большему уменьшению потенциала анода второй лампы и, следовательно, сетки первой лампы и т. д.

Этот процесс уменьшения анодного тока первой и увеличения анодного тока второй лампы будет развиваться лавинообразно и прекратится тогда, когда будет выполняться неравенство $K_1\beta < 1$. В нашем случае это произойдет, когда первая лампа запрется, так как мы предположили, что при отпертой одной из ламп другая должна быть заперта, что достигается определенным подбором величин анодных сопротивлений, сопротивлений цепи связи и источников $+E_a$ и $-E_c$.

Занятое состояние равновесия, соответствующее запертой первой и отпертой второй лампе, будет сохраняться неограниченно долго, поскольку «толчки» токов и напряжений, вызванные перечисленными причинами, не могут

отпереть первую лампу настолько, чтобы выполнялось условие развития скачка.

Рассмотрим, что произойдет, если на сетку запертой лампы $Л_1$ (рис. 9) придет сигнал запуска, например импульс напряжения положительной полярности. Этот импульс будет увеличивать потенциал сетки запертой лампы. Когда в результате этого лампа $Л_1$ отопрется настолько, что вследствие увеличения коэффициента усиления начнет выполняться неравенство $K_1\beta > 1$, то лампа $Л_1$ скачком отопрется, а лампа $Л_2$ скачком запрется.

Действительно, увеличение потенциала сетки лампы $Л_1$ приведет в результате действия цепи обратной связи к еще большему его увеличению и лампа $Л_1$ отопрется, а лампа $Л_2$ за счет уменьшения потенциала анода лампы $Л_1$ запрется. Новое состояние равновесия в отсутствии внешнего сигнала будет также устойчиво, так как потенциалы сеток отпертой и запертой ламп будут определяться соотношениями величин сопротивлений цепей связи.

Для того чтобы вернуть устройство в исходное состояние равновесия, необходимо на вход его (сетку лампы $Л_1$) подать сигнал запуска отрицательной полярности такой амплитуды, которая была бы достаточна после усиления лампой $Л_1$ для отпирания лампы $Л_2$ настолько, чтобы выполнялось условие развития скачка. Если это обеспечивается, то устройство скачком вернется в исходное состояние. Лампа $Л_1$ снова запрется, а лампа $Л_2$ отопрется, т. е., подавая на вход устройства сигналы запуска положительной или отрицательной полярности, можно изменять состояние равновесия устройства. При этом напряжение на выходе будет скачком изменяться от максимального до минимального значения, и наоборот, всякий раз, когда устройство переходит от одного состояния устойчивого равновесия к другому.

В полученном устройстве (рис. 9) безразлично, что мы будем считать входом сетку первой или второй лампы, так как каждый каскад по отношению к другому представляет собой цепь положительной обратной связи. Выходом устройства может быть также анод первой или второй лампы.

В большинстве практических случаев спусковые устройства строятся по симметричной схеме, т. е. на одинаковых лампах и при одинаковых величинах сопротивлений в одноименных плечах:

$$R_{a1} = R_{a2} = R_a;\ R_{c1} = R_{c2} = R_c \text{ и } R_1 = R_2 = R.$$

Условие развития скачка в симметричном устройстве запишется так же, как и раньше, т. е. $K\beta > 1$ (где $K_1 = K_2 = K$ — коэффициент усиления каскада). Коэффициент же передачи получает более простое выражение:

$$\beta = \frac{R_c}{R_c + R}; \qquad (1)$$

В дальнейшем мы будем рассматривать только симметричные спусковые устройства.

В приводимых рассуждениях условие развития скачка выражалось из предположения, что цепи связи состоят из чисто активных сопротивлений. Это справедливо для расчета режима спускового устройства по постоянному току. Однако для анализа динамики процесса его срабатывания условие развития скачка необходимо записывать с учетом паразитных реактивностей цепи связи, которые конструктивно всегда имеются в устройстве. Во время скачка напряжения в устройстве изменяются со скоростью от нескольких вольт до нескольких сот вольт в микросекунду. При таких скоростях паразитные индуктивности еще не успевают проявить себя, и главную роль в делении скачков напряжения при передаче их с анода на сетку играют паразитные емкости. Поэтому коэффициент деления цепи обратной связи при развитии лавинообразного процесса можно выразить так:

$$\beta' = \frac{C_{a\text{-}c}}{C_{a\text{-}c} + C_{c\text{-}к}}, \qquad (2)$$

где $C_{a\text{-}c}$ — паразитная емкость между анодом одной и сеткой другой лампы;

$C_{c\text{-}к}$ — паразитная емкость между сеткой и катодом лампы.

Условие развития скачка с учетом паразитных емкостей цепи связи запишется в виде:

$$K\beta' > 1. \qquad (3)$$

Поскольку емкость $C_{a\text{-}c}$ состоит в основном из паразитной емкости монтажа, а емкость $C_{c\text{-}к}$ включает в себя также и динамическую входную емкость лампы, то $C_{a\text{-}c} < C_{c\text{-}к}$ и $\beta' < 1$. Это неравенство может быть настолько значительным, что даже при больших коэффициентах усиления каскадов условие (3) не может быть выполнено и

устройство не срабатывает даже при больших напряжениях сигнала запуска. Выгодно иметь величину β', близкую к единице не только с точки зрения необходимости выполнения условия (3), а также с точки зрения увеличения скорости скачка. При $\beta'=1$ все изменение анодного напряжения прикладывается полностью к сетке лампы противополож-

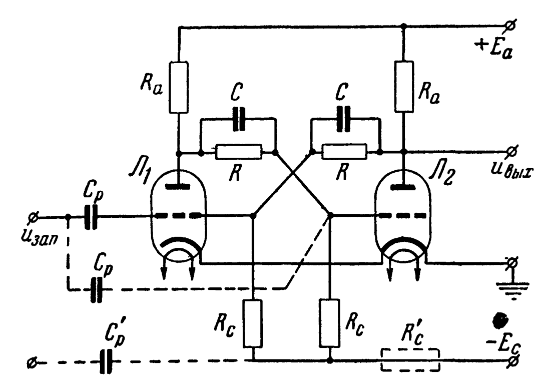


Рис. 10. Схема спускового устройства с анодно-сеточными связями.

ного плеча, поэтому при прочих равных условиях скорость скачка максимальна.

Чтобы приблизить β' к единице, параллельно сопротивлениям R_1 и R_2 цепей связи устройства включают емкости C, приблизительно на порядок бо̀льшие паразитных емкостей $C_{а\text{-}к}$ (обычно порядка 10—100 *пф*). Тогда

$$\beta'=\frac{C_{а\text{-}с}+C}{(C_{а\text{-}с}+C)+C_{к\text{-}с}}. \qquad (2а)$$

Окончательная схема устройства, которое обычно называют спусковым устройством с анодно-сеточными связями, приведена на рис. 10. Оно запускается также и однополярными сигналами. В этом случае их подают на сетки обеих ламп (показано пунктиром). При таком запуске устройство чувствительно к отрицательным импульсам. Это объясняется тем, что изменение напряжения $u'_{с\text{-}к}$ между сеткой и катодом отпертой лампы определяется амплитудой запускающего импульса и совпадает с ним по знаку, а изменение напряжения $u_{с\text{-}к}$ между сеткой и катодом запертой лампы определяется амплитудой запускающего импульса и им-

пульса, действующего через цепь обратной связи с анода отпертой лампы. Поэтому изменение напряжения $u_{с\text{-}к}$ запертой лампы равно разности амплитуд запускающего импульса и импульса, действующего через цепь обратной связи. Амплитуда же последнего превосходит амплитуду запускающего импульса. Поэтому, если на сетки ламп устройства приходит положительный запускающий импульс, то напряжение $u'_{с\text{-}к}$ повышается, а напряжение $u_{с\text{-}к}$ понижается и устройство не срабатывает. При отрицательном же импульсе запуска напряжение $u'_{с\text{-}к}$ понижается, а напряжение $u_{с\text{-}к}$ повышается и устройство переходит в новое состояние устойчивого равновесия.

Сигналы запуска можно также подавать и на аноды. В этом случае они оказываются приложенными к сеткам ламп через цепи связи.

Приведенная на рис. 10 схема спускового устройства обладает некоторыми недостатками. Она требует отдельного источника для подачи отрицательного напряжения на сетки. Кроме того, разделительные емкости $C_р$ подключаются через внутреннее сопротивление генератора запускающего напряжения параллельно входным емкостям ламп (при запуске на сетки) или выходным емкостям ламп (при запуске на аноды). Увеличение входных и выходных емкостей устройства приводит к необходимости увеличения емкостей цепей связи C, чтобы сохранить равенство $\beta' \approx \approx 1$. Это ведет к значительному увеличению длительности фронта выходного перепада напряжения, что крайне нежелательно.

Уменьшить влияние емкостей на крутизну фронта выходного перепада напряжения можно путем включения в цепь сетки ламп общего сеточного сопротивления $R'_с$, на которое и подаются запускающие импульсы. При таком запуске емкость $C'_р$ практически не увеличивает входные емкости ламп, так как она подключена к ним через высокоомные сопротивления $R_с$.

От перечисленных недостатков свободна получившая широкое распространение схема спускового устройства с катодным смещением (рис. 11). Отрицательное смещение на сетки ламп задается посредством включения сопротивления $R_к$ в общую катодную цепь ламп. Получение постоянного смещения возможно потому, что ток, протекающий

через сопротивление $R_к$, приблизительно постоянен в течение всего цикла работы при условии, что схема симметрична.

Преимущество такой схемы перед схемой спускового устройства с внешним источником смещающего напряжения заключается в том, что спусковое устройство с катодным смещением мало чувствительно к изменениям питающих напряжений. Кроме того, устройство не требует дополнительного источника смещающего напряжения, позволяет подавать запускающие сигналы на катоды ламп, в результате чего достигается развязка с источником запускающих импульсов.

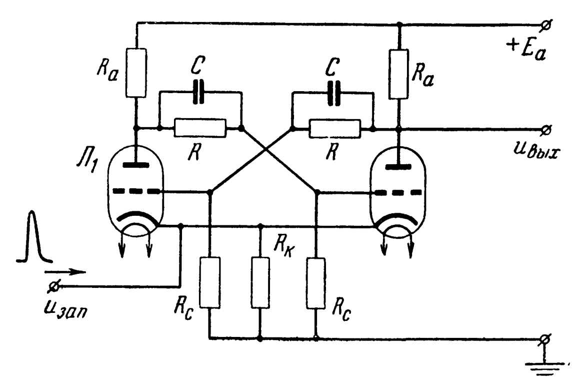


Рис. 11. Схема спускового устройства с анодно-сеточными связями и катодным смещением.

При запуске на катоды ламп спусковое устройство с катодным смещением более чувствительно к положительным сигналам запуска.

5. ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА С АНОДНО-СЕТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

До сих пор мы пользовались динамической характеристикой спускового устройства, не рассматривая способов ее получения. Между тем она легко может быть построена графически по динамическим характеристикам ламп устройства.

В качестве примера рассмотрим разобранную выше схему рис. 10.

Обычно в спусковых устройствах сопротивления R и R_c цепей связи выбираются по крайней мере на порядок

больше сопротивлений R_a для того, чтобы не уменьшать коэффициенты усиления каскадов и не нагружать значительно источник питания. Поэтому токи в цепях связи по сравнению с анодным током отпертой лампы будут очень малы и ими можно пренебречь.

С учетом сказанного анодное напряжение запертой лампы $u_{а\text{-}к} \approx E_a = U_{вых.макс}$, а анодное напряжение отпертой лампы $u'_{а\text{-}к} \approx E_a - I_{a0}R_a = U_{вых.мин}$, где I_{a0} — ток «покоя» отпертой лампы при выбранном режиме работы спускового устройства. В каждой из ламп анодный ток изменяется от нуля до значения I_{a0}, поэтому амплитуда выходного перепада напряжения

$$U = U_{вых.макс} - U_{вых.\ мин} = E_a - (E_a - I_{a0}R_a) = I_{a0}R_a. \quad (4)$$

Спусковые устройства на электронных лампах рассчитываются таким образом, что в состоянии покоя одна из ламп надежно отперта, а другая надежно заперта. Надежное отпирание лампы достигается тем, что соотношение сопротивлений цепей связи и напряжения источников питания подбираются так, чтобы потенциал сетки был выше потенциала катода этой лампы (измеренные при вынутой лампе).

Сопротивление R цепи связи на несколько порядков больше сопротивления участка сетка — катод $R_{с\text{-}к}$ отпертой лампы. Поэтому за счет протекания сеточного тока основная часть напряжения упадет на сопротивление R, и напряжение $u'_{с\text{-}к}$ между сеткой и катодом отпертой лампы будет близко к нулю. Этот режим выгоден тем, что при изменении напряжений источников питания в определенных пределах и при смене ламп напряжение $u'_{с\text{-}к}$ фиксируется на заданном уровне, что повышает стабильность работы устройства, но зато при расчетах он требует учета сеточных токов. Поэтому, чтобы не усложнять изложение, рассмотрим вначале такой режим «покоя» спускового устройства, при котором напряжение $u'_{с\text{-}к}$ между сеткой и катодом отпертой лампы (измеренное при вынутых лампах) равно нулю. Это достигается подбором соотношения сопротивлений цепей связи и величин напряжений источников питания. При этом напряжение на аноде отпертой лампы меньше напряжения E_a на величину U, определяемую формулой (4), а напряжение $u_{с\text{-}к}$ между сеткой и катодом

запертой лампы будет ниже нуля на величину $U\beta$ $\left(\text{где } \beta = \frac{R_c}{R_c + R}\right)$.

Надежное запирание лампы обеспечивается при выполнении неравенства

$$U\beta > |E_{c0}|,$$

где E_{c0} — потенциал запирания лампы.

Для простоты дальнейших рассуждений вначале разорвем цепь обратной связи спускового устройства (рис. 10) и

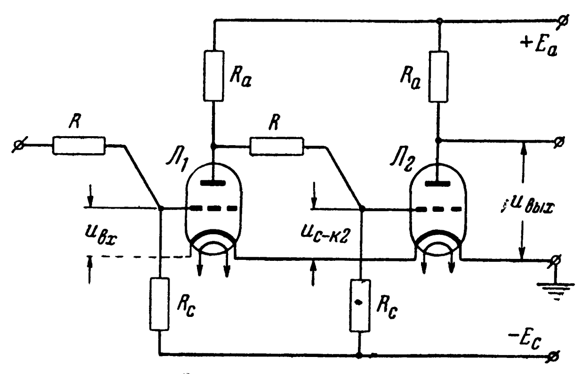


Рис. 12. Схема усилителя постоянного тока, получаемого путем разрывания цепи обратной связи спускового устройства.

рассмотрим работу полученного таким образом усилителя постоянного тока (рис. 12), а затем учтем влияние цепи обратной связи.

На рис. 13,*а* и *б* изображены сеточные динамические характеристики первой и второй ламп устройства. Они строятся, как обычно для усилительного каскада, по точкам пересечения нагрузочной линии с характеристиками анодного тока лампы. Ниже (рис. 13,*в*) изображена основная характеристика усилителя постоянного тока, представляющая собой зависимость выходного напряжения $u_{вых}$ от входного $u_{вх}$. Одноименными точками на характеристиках отмечены значения токов и напряжений, соответствующие определенному состоянию равновесия.

Участок *1-2* характеристики (рис. 13,*в*) соответствует такому напряжению $u_{вх}$, когда лампа $Л_1$ заперта ($i_{a1} = 0$),

а лампа $Л_2$ отперта ($i_{a2}=I_{a0}$). При этом напряжение $U_{вых}$ на аноде выходной лампы $Л_2$ минимально. Всякое изменение напряжения $u_{вх}$ на участке *1-2* характеристики лежит за пределами отпирания лампы $Л_1$. Точка *2* соответствует напряжению отпирания-запирания E_{c01} первой лампы. На этом участке характеристики коэффициент усиления K усилителя равен нулю, т. е. $K=K_1K_2=K^2=0$, где $K_1=K_2=K$ — коэффициенты усиления каскадов. Участок *2-3* характеристики (рис. 13,*в*) соответствует началу отпирания лампы $Л_1$. При этом рабочая точка лежит в зоне малой крутизны сеточной динамической характеристики лампы $Л_1$ (рис. 13,*а*), так что на этом участке $K<1$. При дальнейшем увеличении напряжения $u_{вх}$ лампа $Л_1$ продолжает отпираться и крутизна ее растет. Поэтому на характеристике (рис. 13,*в*) найдется точка (допустим, точка *3*), где коэффициент усиления усилителя станет равным единице, а при дальнейшем увеличении напряжения $u_{вх}$ превысит единицу.

На участке *3-4* (рис. 13,*в*) обе лампы отперты, рабочие точки их сеточных характеристик лежат в зоне нормальной крутизны, поэтому $K>1$. Увеличение напряжения $u_{вх}$ на этом участке вызовет все большее отпирание лампы $Л_1$ и все большее запирание лампы $Л_2$. В точке *4* характеристики $K=1$, так как лампа $Л_2$ начинает запираться и крутизна ее уменьшается.

Точка *5* соответствует моменту запирания лампы $Л_2$. При этом напряжение на выходе усилителя максимально. Верхний горизонтальный участок характеристики, начиная от точки *5*, соответствует запертому состоянию лампы $Л_2$, поэтому на этом участке $K=0$.

Нижний *2-3* и верхний *4-5* изгибы характеристики определяются нижними изгибами динамической сеточной характеристики анодного тока ламп. Если применять лампы с резкой отсечкой анодного тока, то можно получить характеристику усилителя практически без этих изгибов.

Крутизна характеристики на участке *3-4* равна $S=\frac{\Delta u_{вых}}{\Delta u_{вх}}=K$, поэтому, чем больше K, тем круче наклон этого участка. При больших коэффициентах усиления каскадов и одинаковых масштабах осей характеристика на участке *3-4* приближается к вертикальной прямой.

Рассматриваемая характеристика может быть получена экспериментально или построена по сеточным динамическим

характеристикам ламп. Она необходима для построения статической характеристики спускового устройства (рис. 13,*г*) Под статической характеристикой спускового устройства понимают зависимость выходного напряжения от напряжения сигнала запуска, подаваемого на сетку входной лампы, при отсутствии обратной связи, но при выполнении тех соотношений между выходным и входным напряжением, которые существуют в устройстве при замкнутой цепи обратной связи, т. е. в спусковом устройстве.

Входное напряжение спускового устройства складывается из трех напряжений:

$$u_{вх} = -u_c + u_{вых}\beta + u_{зап}, \qquad (5)$$

где $-u_c$ — напряжение смещения;

$u_{вых}\beta$ — напряжение обратной связи;

$u_{зап}$ — напряжение сигнала запуска, измеренное между сеткой и катодом входной лампы.

При снятии статической характеристики согласно ее определению напряжение $u_{зап}$ должно удовлетворять уравнению (5), поскольку это уравнение определяет соотношение между напряжениями $u_{вх}$ и $u_{вых}$ в спусковом устройстве. Но напряжения $u_{вх}$ и $u_{вых}$ связаны также между собой зависимостью, отражаемой характеристикой, приведенной на рис. 13,*в*. Используя эту характеристику и уравнение (5), выясним ход статической характеристики спускового устройства (рис. 13,*г*).

Увеличение напряжения $u_{вх}$ до значения, соответствующего точке *3* (рис. 13,*в*), не вызовет значительного увеличения напряжения $u_{вых}$. Поэтому на этом участке характеристики напряжение $u_{зап}$ должно возрастать, чтобы выполнялось уравнение (5). Начиная с точки *3* до точки *4* характеристики, каждому приращению напряжения $u_{вх}$ соответствует в K раз большее приращение напряжения $u_{вых}$. Поэтому на этом участке характеристики для выполнения уравнения (5) необходимо уменьшать напряжение $u_{зап}$, поскольку $K\beta \gg 1$. По мере запирания лампы $Л_2$, начиная с точки *4* кривой, напряжение $u_{вых}$ перестает расти, поэтому для выполнения равенства (5) необходимо снова увеличивать напряжение $u_{зап}$.

Все точки статической характеристики представляют собой точки устойчивого равновесия, так как она сни-

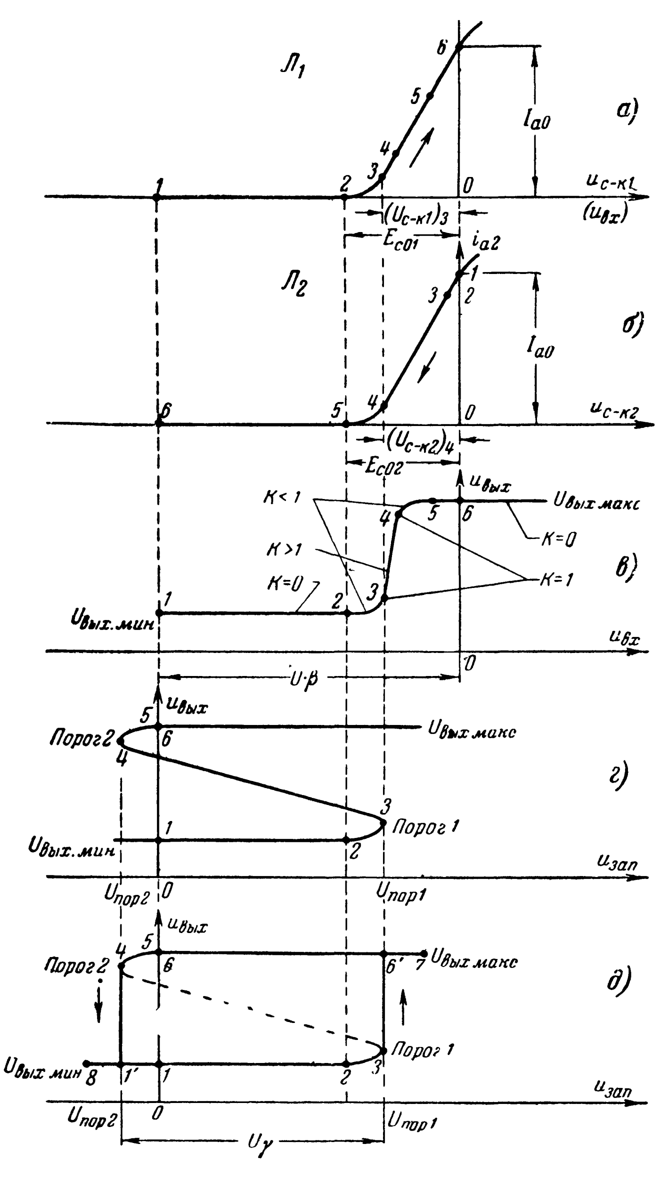


Рис. 13. Характеристики спускового устройства с анодно-сеточными связями.

а и *б* — сеточные динамические характеристики первой и второй ламп; *в* — характеристика усилителя постоянного тока; *г* — статическая характеристика; *д* — динамическая характеристика.

малась при разомкнутой цепи обратной связи. Падающий участок характеристики соответствует $K > 1$, поэтому точки *3* и *4*, в которых $K=1$, будут точками поворота статической характеристики.

Статическая характеристика может быть построена по точкам по уравнению (5) с учетом характеристики, изображенной на рис. 13,*в*.

Динамической характеристикой спускового устройства (рис. 13,*д*) называют также зависимость выходного напряжения от напряжения запуска, но снятую при наличии обратной связи. Динамическая характеристика будет отличаться от статической тем, что область характеристики, заключенная между пороговыми точками *3* и *4* (изображенная на рис. 13,*д* пунктиром), представляет собой область неустойчивых состояний равновесия, так как в пределах ее $K\beta' > 1$ (считая $\beta' \approx 1$), т. е. выполняется условие развития скачка. Поэтому при экспериментальном снятии динамической характеристики область *3-4* не может быть получена.

Действительно, при увеличении напряжение $u_{зап}$ до значения, превышающего пороговое напряжения $U_{пор\,1}$, рабочая точка динамической характеристики попадает в область, где $K > 1$. А так как $\beta' \approx 1$, то при этом коэффициент усиления в цепи обратной связи станет больше 1 и в устройстве разовьется лавинообразный процесс изменения токов и напряжений, в результате которого лампа $Л_2$ запрется, а лампа $Л_1$ отопрется. Напряжение на выходе скачком увеличится до значения $U_{вых.\,макс}$ (точка *6'* на рис. 13,*д*). При переходе сигналом запуска напряжения $U_{пор\,2}$ напряжение на выходе устройства скачком уменьшится до значения $U_{вых.мин}$ (точка *1'*).

Рассмотрим теперь, какими параметрами определяется величина напряжения гистерезиса динамической характеристики. Обычно для спускового устройства применяются лампы с резкой отсечкой анодного тока, поэтому для упрощения последующих формул можно полагать, что точки *2* и *3*, *4* и *5* (рис. 13,*а* и *б*) практически совпадают, т. е. $|E_{c01}| - |(u_{с\text{-}к1})_3| \ll |E_{c01}|$ и $|E_{c02}| - |(u_{с\text{-}к2})_4| \ll |E_{c02}|$. С учетом этого упрощения величина напряжения $U_{пор1}$ определится как

$$U_{пор1} \approx U\beta - |E_{c01}|. \tag{6}$$

Увеличение напряжения $u_{зап}$ (точка 7 на рис. 13,*д*) или уменьшение его до нуля (точка 6) не вернет устройство в исходное состояние равновесия, так как лампа $Л_2$ заперта. При дальнейшем уменьшении напряжения $u_{зап}$ лампа $Л_2$ начнет отпираться. Для того чтобы перевести устройство в исходное состояние равновесия, необходимо уменьшить напряжение запуска на такую величину $U_{пор2}$, чтобы усиленное в K раз и ослабленное в β раз цепью обратной связи оно увеличивало бы напряжение на сетке запертой лампы $Л_2$ до значения, при котором $K=1$, т. е.

$$|U_{пор2}|K\beta \approx U\beta - |E_{c02}|.$$

Отсюда

$$|U_{пор2}| \approx \frac{U\beta - |E_{c02}|}{K\beta}. \qquad (7)$$

Когда напряжение $u_{зап}$ перейдет пороговое значение $U_{пор2}$, рабочая точка динамической характеристики попадает в область, где $K>1$, и устройство скачком вернется в исходное положение равновесия (точка 1' на рис. 13,*д*); лампа $Л_1$ запрется, а лампа $Л_2$ отопрется и напряжение на выходе скачком уменьшится до значения $U_{вых.мин}$. Дальнейшее уменьшение напряжения запуска (точка 8) или увеличение его до нуля (точка 1) не изменит состояния равновесия устройства.

Выразим напряжение гистерезиса как сумму пороговых напряжений:

$$U_{\gamma} = U_{пор1} + |U_{пор2}| \approx U\beta - |E_{c01}| + \frac{U\beta - |E_{c02}|}{K\beta}. \qquad (8)$$

Как видно из этого уравнения, напряжение гистерезиса можно изменять, в основном, путем изменения величин U и β. Если, не изменяя величин U и β, уменьшить (по абсолютному значению) напряжение E_c на величину ΔE_c, то напряжение между сеткой отпертой лампы и катодом $u'_{с\text{-}к} \approx$ $\approx E_a\beta - E_c\frac{R}{R+R_c}$ уже не будет равно нулю, как мы предполагали вначале, а увеличится и станет $u'_{с\text{-}к} = \Delta E_c \frac{R}{R+R_c}$ (измеренное при вынутых лампах). Соответственно напряжение между сеткой и катодом запертой лампы $u_{с\text{-}к} =$

$= (E_a - U)\beta - E_c \frac{R}{R + R_c}$ также увеличится и станет $u_{с\text{-}к} =$
$= (E_a - U)\beta - (E_c - \Delta E_c) \cdot \frac{R}{R + R_c}$.

Теперь, для того чтобы отпереть запертую лампу $Л_1$, необходимо приложить меньшее напряжение запуска, чем то, которое определялось формулой (6), на величину $u'_{с\text{-}к}$. Но при этом срабатывание устройства еще не происходит, так как на сетке лампы $Л_2$ действует положительное напряжение $u'_{с\text{-}к}$ (измеренное при вынутых лампах), ограниченное сеточным током до значения, близкого к нулевому. Поэтому дальнейшее увеличение напряжения запуска, приводящее к уменьшению анодного потенциала лампы $Л_1$, в общем случае не будет изменять потенциал сетки отпертой лампы $Л_2$ настолько, чтобы выполнялось условие развития скачка, поскольку потенциал сетки этой лампы автоматически фиксируется на значении, близком к нулю, за счет протекания сеточного тока.

В этом наиболее общем случае работы спускового устройства пороговые точки характеристики (рис. 13,*в*) должны определяться с учетом характеристики сеточного тока. В первом приближении будем считать, что сеточный ток отпертой лампы уменьшается настолько, что начинает выполняться условие развития скачка, когда дальнейшее увеличение напряжения запуска и, следовательно, уменьшение анодного потенциала лампы компенсирует напряжение $u'_{с\text{-}к}$ отпертой лампы $Л_2$.

С учетом сказанного для общего случая работы спускового устройства величина $U_{пор1}$ будет выражаться как

$$U_{пор1} \approx U\beta - |E_{c01}| - u'_{с\text{-}к} + \frac{u'_{с\text{-}к}}{K\beta}. \qquad (9)$$

С увеличением напряжения запуска так, что $u_{зап} > U_{пор1}$, произойдет срабатывание устройства: лампа $Л_1$ отопрется, а лампа $Л_2$ запрется. Для возврата устройства в исходное состояние равновесия необходимо уменьшить потенциал сетки отпертой лампы $Л_1$ на величину $u'_{с\text{-}к}$, затем и на величину, определяемую формулой (7), т. е.

$$|U_{пор2}| \approx \frac{U\beta - |E_{c02}|}{K\beta} + u'_{с\text{-}к}. \qquad (10)$$

Формулы (9) и (10) позволяют с точностью до 15—20% оценить величину напряжения U_γ:

$$U_\gamma = U_{пор1} + |U_{пор2}| \approx U\beta - |E_{c01}| + \frac{U\beta - |E_{c02}| + u'_{с\text{-}к}}{K\beta}. \quad (11)$$

Из формул видно, что при $u'_{с\text{-}к} > 0$ ось ординат динамической характеристики сместится вправо относительно прежнего положения на величину $u'_{с\text{-}к}$, но значение U_γ практически остается неизменным. Смещение оси ординат динамической характеристики вправо возможно также за счет увеличения β, но при этом увеличивается напряжение гистерезиса U_γ. Для схем спусковых устройств с анодно-сеточными связями величина напряжения U_γ находится в прямой зависимости от амплитуды U выходного перепада напряжения.

6. СПУСКОВЫЕ УСТРОЙСТВА С КАТОДНОЙ СВЯЗЬЮ

Кроме рассмотренных вариантов схем спусковых устройств с анодно-сеточными связями, возможны также схемы с катодной связью.

Свяжем выход усилительного каскада с катодом через цепь обратной связи, имеющую коэффициент передачи β (рис. 14). В устройстве с такой обратной связью будут также возможны скачки токов и напряжений, если любые изменения потенциала сетки, анода или анодного тока приведут в результате действия цепи обратной связи к нарастанию этих изменений. Рассмотрим, как осуществить цепь обратной связи, чтобы это условие выполнялось.

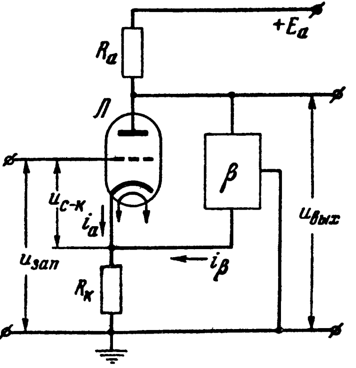


Рис. 14. Схема усилительного каскада с обратной связью с анода на катод через цепь β.

Через сопротивление $R_к$ протекает анодный ток i_a и ток цепи обратной связи i_β. Падение напряжения на сопротивлении $R_к$, вызванное этими токами, прикладывается к сетке усилительного каскада в виде смещающего напряжения. Любое изменение анодного тока вызовет изменение потенциала катода и, следовательно, напряжения $u_{с\text{-}к}$. Изменение

напряжения $u_{с\text{-}к}$ будет тормозить изменение тока i_a. Так, если анодный ток по какой-либо причине увеличится, то потенциал катода увеличится за счет увеличения падения напряжения на сопротивлении $R_к$, что приведет к уменьшению анодного тока. Такая связь называется отрицательной.

Для того же, чтобы изменение тока привело не к уменьшению, а к нарастанию этого изменения, необходимо создать положительную обратную связь, преобладающую над отри-

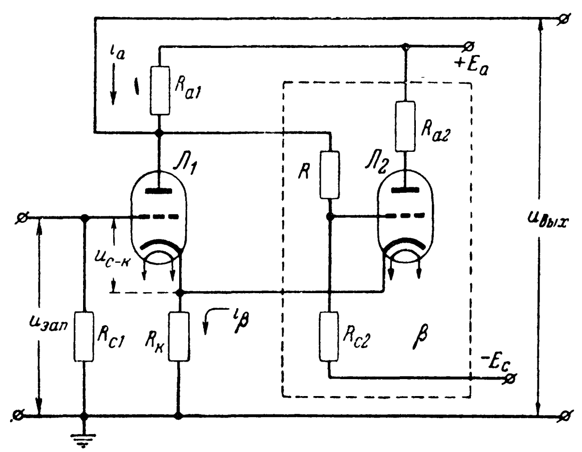


Рис. 15. Структура цепи обратной связи с анода на катод усилительного каскада.

цательной. Последнее возможно, когда всякое изменение Δi_β тока i_β, вызванное изменением тока i_a, больше изменения Δi_a тока i_a, т. е. $\Delta i_\beta > \Delta i_a$, другими словами, когда коэффициент усиления в цепи обратной связи по току больше единицы $\left(K_i = \frac{\Delta i_\beta}{\Delta i_a} > 1\right)$. Кроме этого, необходимо обеспечить и правильную фазировку цепи обратной связи. Так, если ток i_a увеличился, то это увеличение будет нарастать, если ток i_β уменьшится в K_i раз по отношению к величине начального приращения тока i_a.

Эти условия легко выполняются, если цепь обратной связи β выполнить по схеме, представленной на рис. 15. Допустим, что по каким-либо причинам напряжение на сетке лампы $Л_1$ увеличилось, что вызвало приращение анодного

тока на Δi_{a1}. Это приращение сеточного напряжения усилится в K_1 раз (где K_1 — коэффициент усиления по напряжению первого каскада), разделится в $\frac{R_c}{R+R_c}$ раз и приложится к сетке лампы $Л_2$ в противофазе. Так как $K_1 \gg 1$, то уменьшение напряжения на сетке лампы $Л_2$ по абсолютной величине будет больше первоначального увеличения напряжения на сетке лампы $Л_1$ в $K_1 \frac{R_c}{R+R_c}$ раз. При примерно равной крутизне ламп уменьшение анодного тока второй лампы будет во много раз больше увеличения анодного тока первой, т. е.

$$\Delta i_{\beta} \gg \Delta i_{a} \quad \text{и} \quad K_i = \frac{\Delta i_{\beta}}{\Delta i_{a}} \gg 1.$$

Одно из состояний устойчивого равновесия в таком устройстве фиксируется цепью $R - R_c$. Величина этих сопротивлений и величина источника смещающего напряжения — E_c подбираются таким образом, чтобы при отпертой первой лампе вторая лампа была надежно заперта. Второе состояние устойчивого равновесия обеспечивается тем, что при отпертой второй лампе анодный ток ее создает падение напряжения на сопротивлении $R_к$, большее потенциала запирания первой лампы. При этом первая лампа должна быть надежно заперта настолько, чтобы случайные причины не могли отпереть эту лампу и нарушить условие состояния устойчивого равновесия, представляющее собой неравенство $K_i < 1$.

С учетом паразитных емкостей условие развития скачка в таком устройстве запишется так же как $K_1\beta' > 1$, так как при этом, если крутизна лампы $Л_2$ в рабочем режиме не меньше крутизны лампы $Л_1$, то автоматически выполняется и условие $K_i > 1$. Чтобы приблизить коэффициент передачи β' анодно-сеточной цепи связи к единице для быстродействующих процессов, сопротивление R шунтируется небольшой емкостью C.

Напряжение выхода можно снимать с анода лампы $Л_1$ или с катодов ламп. Часто напряжение выхода снимается с анода второй лампы (рис. 16). Это удобно тем, что цепь выхода не входит в цепь обратной связи, поэтому влияние ее на развитие скачка в устройстве практически исключено.

Устройство, схема которого дана на рис. 16, работает

следующим образом. Предположим, что начальный момент равновесия соответствует запертой первой и отпертой второй лампе. Это состояние равновесия может изменить только положительный сигнал запуска, так как отрицательный сигнал еще больше запрет лампу. Если сигнал запуска отпирает первую лампу настолько, что начинает выполняться условие развития скачка, то любое увеличение анодного тока i_{a1} лампы $Л_1$ приведет к уменьшению ее анодного потенциала, которое передается на сетку лампы $Л_2$ и вызовет

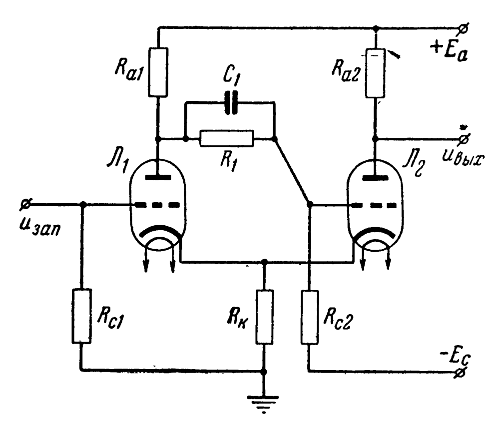


Рис. 16. Схема спускового устройства с катодной связью и внешним источником смещающего напряжения.

уменьшение ее анодного тока. Последнее приведет к уменьшению потенциала катода и к еще большему увеличению тока лампы $Л_1$. Это в свою очередь вызовет еще большее уменьшение тока лампы $Л_2$ и т. д. Начнется лавинообразный процесс увеличения тока первой и уменьшения тока второй лампы, который прекратится, когда лампа $Л_1$ отопрется, а лампа $Л_2$ запрется. В результате этого процесса ток второй лампы скачком уменьшится, а ток первой лампы скачком возрастет. Напряжение на выходе скачком увеличится.

Для перевода устройства в исходное состояние равновесия необходимо на вход его подать сигнал запуска отрицательной полярности. Если амплитуда этого сигнала достаточна для отпирания лампы $Л_2$ настолько, что будет выполняться условие скачка, то устройство скачком вернется в исходное состояние равновесия. Лампа $Л_1$ снова запрется,

а лампа $Л_2$ отопрется. Напряжение на выходе скачком уменьшится.

Устройство, охваченное положительной связью по схеме (рис. 14), называют спусковыми устройствами с катодной связью.

Рассмотренный вариант имеет тот недостаток, что требует отдельного источника смещающего напряжения. От

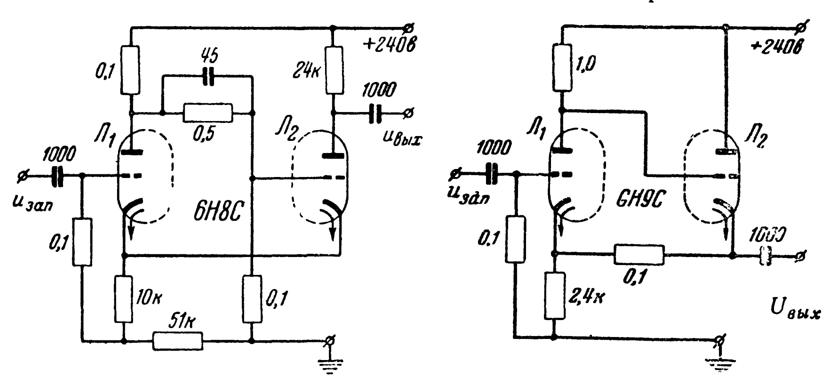


Рис. 17. Схема спускового устройства с катодной связью и катодным смещением.

Рис. 18. Схема спускового устройства с катодной связью, имеющего минимальное количество сопротивлений.

этого недостатка свободны спусковые устройства, схемы которых представлены на рис. 17 и 18. Однако в этих устройствах лампа $Л_2$ полностью не запирается при отпертой лампе $Л_1$, что несколько уменьшает стабильность работы. По сравнению со спусковыми устройствами с анодно-сеточными связями спусковые устройства с катодной связью требуют меньшего количества деталей.

7. ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА С КАТОДНОЙ СВЯЗЬЮ

В ряде случаев требуются спусковые устройства, имеющие динамическую характеристику с малым напряжением гистерезиса и малой зависимостью его от выходного напряжения.

Рассмотрим, какие параметры устройства влияют на величину напряжения гистерезиса. Обратимся к динамической характеристике спускового устройства с катодной связью, изображенной на рис. 19,*в*. Для удобства рассмотрения там же (рис. 19,*а* и *б*) представлены сеточные дина-

мические характеристики первой и второй ламп, построенные по точкам пересечения нагрузочной линии с анодными характеристиками ламп. Одноименными точками на характеристиках отмечены состояния равновесия, соответствующие данному моменту времени.

Допустим, что в начальный момент лампа $Л_1$ заперта, а лампа $Л_2$ отперта (точки *1* на рис. 19,*а* и *б*).

При расчете таких устройств режим подбирается таким образом, что напряжение $u'_{c\text{-}к2} > 0$ (измеренное при вынутой лампе $Л_2$). Тогда за счет протекания сеточного тока в лампе $Л_2$ напряжение $u'_{c\text{-}к2}$ будет близко к нулевому значению (точка *1'* на рис. 19,*б*).

Для отпирания лампы $Л_1$ необходимо к сетке этой лампы приложить напряжение запуска $u_{зап} = U_{\gamma 1} = I_{a02} R_к - |E_{c01}|$. Для выполнения условий развития скачка напряжение запуска необходимо увеличить еще на такую величину $U_{\gamma 2}$, при которой крутизна лампы $Л_1$ увеличится, а сеточные токи лампы $Л_2$ уменьшатся настолько, что коэффициент усиления в цепи обратной связи будет больше единицы. На кривых рис. 19 этот момент условно обозначен точкой *3*. Величина напряжения $U_{\gamma 2}$ имеет величину от нескольких вольт до нескольких десятых вольта и может быть определена путем учета сеточного тока.

Дальнейшее увеличение напряжения запуска приводит к срабатыванию устройства. Лампа $Л_2$ запрется, напряжение на ее сетке скачком уменьшится до величины $U_{c\text{-}к2} > |E_{c02}|$ (рис. 19,*б*), а напряжение на выходе устройства скачком увеличится до значения $U_{вых.макс} = E_a$ (точка *4* на рис. 19,*в*). Дальнейшее увеличение напряжения или уменьшение его до нуля не изменит состояния равновесия устройства, так как лампа $Л_2$ останется запертой. В этом состоянии равновесия при $u_{зап} = 0$ через отпертую лампу $Л_1$ протекает ток I_{a1}, определяемый точкой пересечения сеточной динамической характеристики с линией, проведенной из начала координат под углом $\alpha = \operatorname{arcctg} R_к$ (точка *4'* на рис. 19,*а*).

Для возврата устройства в исходное состояние равновесия необходимо уменьшить напряжение $u_{зап}$ на такую величину $U_{\gamma 3}$, которая, усиленная в K_1 раз первым каскадом и ослабленная в β раз цепью связи, отопрет лампу $Л_2$ настолько, что коэффициент усиления в цепи обратной

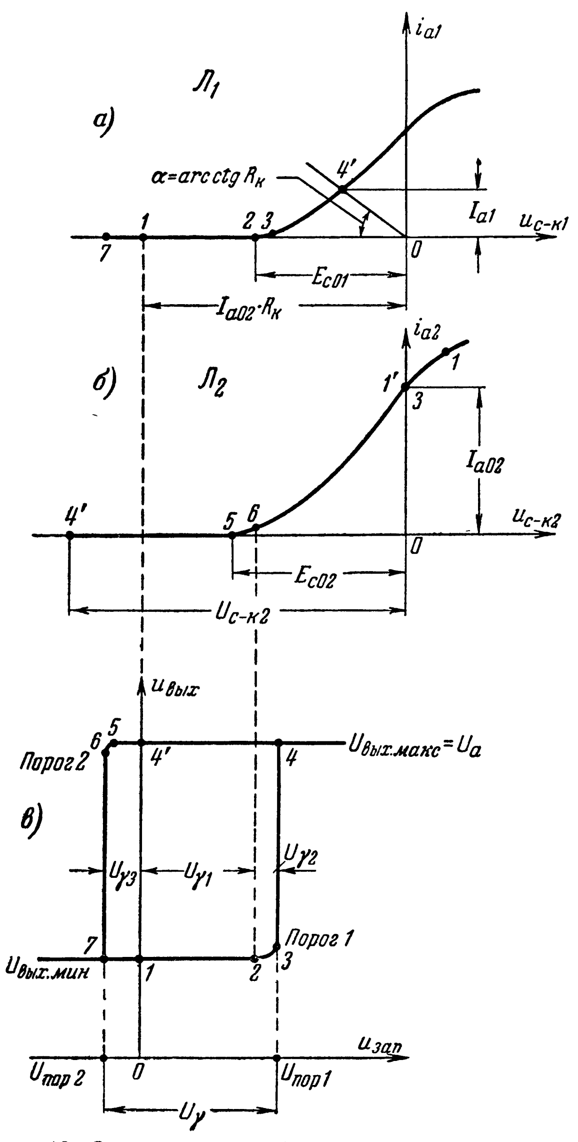


Рис. 19. Спусковое устройство с катодной связью.
а и *б* — сеточные динамические характеристики первой и второй ламп; *в*—динамическая характеристика.

связи станет больше единицы (точки *6* на рис. 19,*б* и *в*). Величина $U_{\gamma 3}$ также лежит в пределах от нескольких вольт до десятых долей вольта. Уменьшение напряжения $u_{зап}$ на величину, превышающую $U_{\gamma 3}$, вызовет новое срабатывание устройства. Лампа $Л_1$ запрется, а лампа $Л_2$ отопрется (точки *7* на рис. 19,*а* и *в*). Напряжение на выходе скачком упадет до величины $u_{вых} = U_{вых.мин} = E_a - I_{a02}R_{a2}$. Дальнейшее уменьшение напряжения $u_{зап}$ или увеличение его до нуля (точка *1* на рис. 19,*в*) не изменит состояния равновесия устройства, так как лампа $Л_1$ остается запертой.

Таким образом, ширину динамической характеристики можно изменять путем изменения сопротивления $R_к$ или изменением величины тока I_{a1}. При этом необходимо учитывать, что изменение сопротивления $R_к$ вызывает изменение тока I_{a1}, в результате чего может нарушиться расчетный режим работы устройства. Путем соответствующего подбора параметров напряжение гистерезиса U_{γ} может быть сделано очень небольшим.

Включив в цепь сетки первой лампы источник отрицательного смещения, можно сместить ось ординат динамической характеристики влево, не изменяя величины напряжения U_{γ}. Полученный при этом режим работы спускового устройства будет соответствовать режиму, изображенному на рис. 2.

8. СПУСКОВОЕ УСТРОЙСТВО НА ТОЧЕЧНОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ТРИОДЕ

За последнее время получили распространение спусковые устройства на полупроводниковых триодах. Рассмотрим принцип действия таких устройств, построенных на точечных триодах с проводимостью типа *р-п-р*. Известно, что эти триоды обладают коэффициентом усиления по току, бóльшим единицы $\left(K_i = \frac{\Delta i_к}{\Delta i_э} > 1\right)$ в рабочей области статических характеристик. Это значит, что изменение $\Delta i_э$ тока $i_э$ эмиттера (рис. 20, *а*) вызывает большее изменение $\Delta i_к$ тока $i_к$ коллектора ($\Delta i_к > \Delta i_э$).

Если цепь коллектора такого триода связать с цепью эмиттера таким образом, чтобы это изменение тока коллектора вызывало новое изменение того же знака тока

эмиттера (т. е. связать эмиттер и коллектор цепью положительной обратной связи), то получится устройство, которое можно поставить в спусковой режим работы.

В точечных полупроводниковых триодах такая связь осуществляется весьма просто. Ввиду того, что эмиттер, база и коллектор обладают сопротивлениями, цепи эмиттера, базы и коллектора имеют связь друг с другом. В частности, благодаря протеканию тока $i_б$ создается положительная обратная связь, которая может быть усилена включением в цепь базы сопротивления $R_б$ (рис. 20, *б*).

Рассмотрим, каким образом проявляется эта связь. При увеличении от нуля напряжения $E_к$ возникает ток $i_б$, создающий на сопротивлении $R_б$ потенциал $u_б = -i_б R_б < 0$. Вследствие этого потенциал эмиттера $u_{э\text{-}б}$ (относительно базы) становится положительным, что обусловливает возрастание тока эмиттера и соответственно тока коллектора. В определенной области значений тока $i_к$ возрастание последнего вызывает рост тока $i_б$, что в свою очередь увеличивает напряжение $u_{э\text{-}б}$ и тока $i_э$ и т. д. В этом режиме любое изменение тока $i_к$ или $i_э$ приводит в результате действия такой цепи положительной обратной связи к нарастанию этого изменения. А это означает, что коэффициент усиления в цепи обратной связи становится больше единицы, т. е. изменение одного из токов, например тока эмиттера $\Delta i_{э1}$, приводит в результате действия цепи обратной связи к новому изменению этого тока $\Delta i_{э2}$ того же знака, но большей величины.

Приведенные простые рассуждения говорят о том, что при определенных условиях в таком триоде возможно

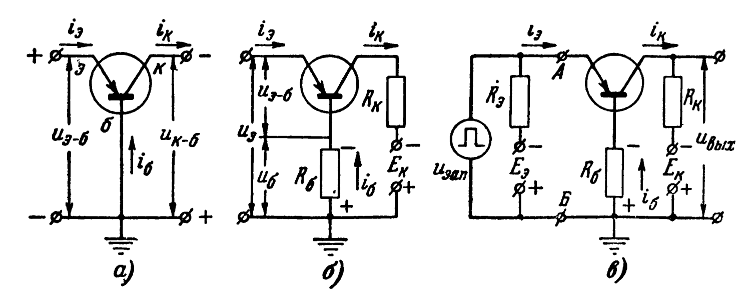


Рис. 20. Построение спускового устройства на точечном полупроводниковом триоде.

осуществить лавинообразный процесс изменения токов $i_э$ и $i_к$. Действие положительной обратной связи обусловливает наличие в вольт-амперных характеристиках точечных триодов падающих участков, на которых триод ведет себя как отрицательное сопротивление.

На рис. 21 изображены вольт-амперные характеристики входа рассматриваемого устройства, представляющие собой

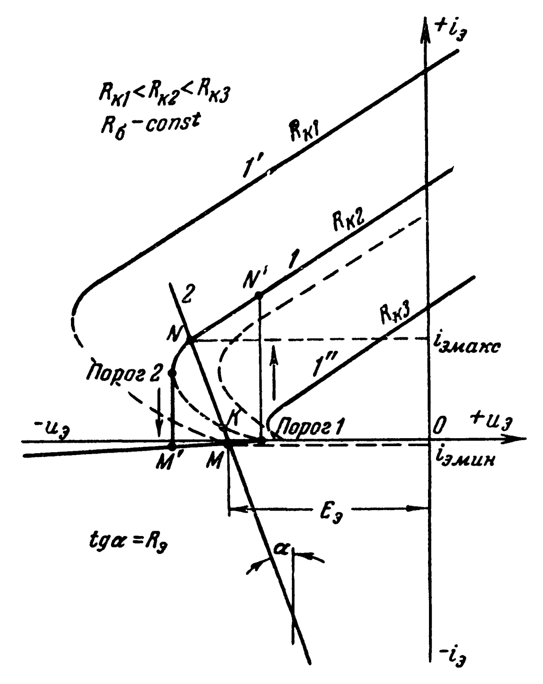


Рис. 21. Вольт-амперные характеристики входа и выбор режима работы спускового устройства, построенного на точечном полупроводниковом триоде.

зависимость тока эмиттера $i_э$ от потенциала эмиттера $u_э$; участок вольт-амперной характеристики, заключенный между пороговыми точками, соответствует состояниям неустойчивого равновесия, а верхняя и нижняя ветви характеристики до пороговых точек — состояниям устойчивого равновесия. Это объясняется тем, что при отрицательных значениях и при больших положительных значениях тока $i_э$ коэффициент усиления по току триода снижается до

значения $K_i < 1$. В этом можно убедиться из рассмотрения статических характеристик триода. Отрицательные значения тока $i_э$ соответствуют отрицательным значениям напряжения $u_{э\text{-}б}$ и очень большому сопротивлению эмиттерного перехода. Поэтому наклон вольт-амперной характеристики на этом участке весьма мал.

Ход вольт-амперной характеристики в значительной степени зависит от величин сопротивлений $R_к$ и $R_б$. При $R_б = \mathrm{const}$, чем меньше величина сопротивления $R_к$, тем в больших пределах изменения токов $i_э$ и $i_к$ выполняется условие $K_i > 1$ и тем больше величина падающего участка вольт-амперной характеристики (кривые *1*, *1'*, *1''* на рис. 21). При $R_к = \mathrm{const}$ бо́льшим величинам сопротивления $R_б$ соответствует и более глубокая положительная обратная связь, а следовательно, бо́льшая величина и наклон падающего участка вольт-амперной характеристики. Изменяя величины сопротивлений $R_к$ и $R_б$, можно в значительных пределах деформировать вольт-амперную характеристику, что значительно облегчает выбор необходимого режима работы.

Чтобы получить на основе устройства, изображенного на рис. 20, *б*, спусковое устройство с двумя состояниями устойчивого равновесия, необходимо в цепь эмиттера включить сопротивление $R_э$ такой величины, чтобы линия нагрузки (линия *2* на рис. 21) пересекала все три участка вольт-амперной характеристики. Это можно сделать только путем включения в цепь эмиттера отрицательного источника напряжения $-E_э$ (рис. 20, *в*).

Вольт-амперная характеристика отображает свойства системы, расположенной правее зажимов *А—Б* (рис. 20, *в*), и не зависит от свойств линейной цепи, включаемой левее этих зажимов. Возможные состояния равновесия системы определяются корнями системы уравнений, одним из которых является вольт-амперная характеристика (допустим, кривая *1* на рис. 21), а другим — уравнение линейной цепи. Последнее представляет собой равенство: $u_э = E_э + i_э R_э$ (где значение тока $i_э$ берется со своим знаком). Графическим решением этих уравнений будут точки пересечения вольт-амперной характеристики с линией нагрузки (точки *K*, *M*, *N* на рис. 21). Точка *K* соответствует состоянию неустойчивого равновесия, поэтому устройство в момент подключения к нему источников питания займет одно из

двух возможных состояний устойчивого равновесия, характеризуемых точками M или N.

Полученное спусковое устройство (рис. 20, *в*) состоит из незначительного количества деталей и может работать при небольших напряжениях источников питания. Сигналы запуска подаются в цепь эмиттера. Выходные перепады напряжения снимаются с коллектора триода.

Рассмотрим принцип действия такого устройства. Допустим, что исходное состояние равновесия устройства соответствует точке M характеристики (рис. 21). При этом потенциал эмиттера относительно базы $u_{э\text{-}б} < 0$ и ток $i_э$ имеют направление, обратное показанному на рис. 20, *в*. Если на эмиттер подать положительный сигнал запуска такой амплитуды, чтобы увеличенный этим сигналом потенциал $u_э$ превысил напряжение $U_{пор1}$ (рис. 21), то рабочая точка попадет в область неустойчивого состояния равновесия. Потенциал эмиттера станет выше потенциала базы ($u_{э\text{-}б} > 0$) и направление тока $i_э$ изменится на положительное. При этом коэффициент усиления по току триода становится больше единицы ($K_i > 1$). Поэтому приращение тока эмиттера $\Delta i_э$ вызовет еще большее приращение тока коллектора $\Delta i_к$, т. е. $\Delta i_к > \Delta i_э$.

Так как обычно $R_б > R_э$, а ток $i_б$ равен разности токов $i_э$ и $i_к$, то уменьшение потенциала базы происходит быстрее, чем уменьшение потенциала эмиттера. Вследствие этого напряжение $u_{э\text{-}б}$ станет еще более положительным и ток $i_э$ еще больше увеличится. Это увеличение тока $i_э$ вызовет еще большее увеличение тока $i_к$, которое в свою очередь в результате действия цепи обратной связи приводит к новому увеличению тока $i_э$ и т. д.

Поскольку коэффициент усиления по току больше единицы, то этот процесс нарастания токов идет лавинообразно с большой скоростью, и токи $i_э$ и $i_к$ скачком увеличатся (точка N' характеристики, рис. 21).

После уменьшения напряжения сигнала запуска до нуля состояние равновесия определится точкой N.

Для перевода устройства в исходное состояние равновесия необходимо подать сигнал запуска отрицательной полярности такой величины, чтобы уменьшенный этим сигналом потенциал $u_э$ превышал по абсолютной величине напряжение $U_{пор2}$ (рис. 21). Состояние равновесия станет

неустойчивым, и токи $i_э$ и $i_к$ скачком уменьшатся до прежних значений.

Пределы изменения тока $i_э$ определяются из характеристики (рис. 21). Зная эти пределы (т. е. $i_{э.макс}$ и $i_{э.мин}$) по статической характеристике триода, представляющей собой зависимость тока $i_к$ от напряжения $u_{к\text{-}б}$, нетрудно определить пределы изменения тока $i_к$. Для этого в плоскости этой характеристики через точку $u_{к\text{-}б} = E_к$ необходимо провести линию нагрузки под углом к оси токов $\alpha = \operatorname{arc\,tg} R_к$ (сопротивлением в цепи базы $R_б$ можно пренебречь, так как обычно $R_к \gg R_б$). Проектируя точки пересечения кривых $i_{э.макс}$ и $i_{э.мин}$ с этой нагрузочной линией на ось токов, получим значения $i_{к.макс}$ и $i_{к.мин}$. Перепад выходного напряжения устройства равен $U = R_к (i_{к.макс} - i_{к.мин})$.

Зная значения $U_{пор1}$ и $U_{пор2}$, можно построить и динамическую характеристику такого устройства, которую здесь не приводим, так как она повторяет ход вольтамперной характеристики.

Кроме точечных полупроводниковых триодов для спусковых устройств такого типа могут применяться и другие полупроводниковые приборы, имеющие коэффициент усиления по току больше единицы.

Спусковые устройства можно выполнить и на двух полупроводниковых триодах замыканием их цепью положительной обратной связи. Такие схемы, так же как рассмотренные ламповые схемы спусковых устройств, позволяют управлять динамической характеристикой в более широких пределах.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

9. КОММУТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Способность спусковых устройств изменять скачком свое состояние равновесия всякий раз, когда напряжение сигнала запуска переходит пороговые значения, и сохранять его неограниченно долго или в течение времени действия сигнала запуска используется для решения ряда различных задач. Рассмотрим более подробно некоторые из них.

Спусковые устройства применяются в системах автоматического регулирования и управления для целей коммутации электрических цепей. Примером такого применения может служить спусковое устройство, в цепь выхода которого включается какой-либо электромеханический прибор (например, электромагнитное реле). Такая схема управления электромеханическими приборами удобна тем, что позволяет управлять последними посредством маломощных сигналов запуска. При расчете таких устройств необходимо обеспечить ток в цепи выхода, достаточный для нормальной

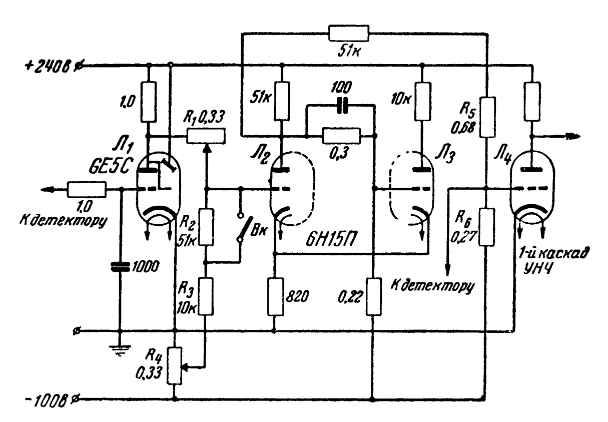


Рис. 22. Схема блока бесшумной настройки приемника с использованием спускового устройства.

работы включенных приборов. Так, в случае электромагнитного реле ток в цепи выхода спускового устройства должен превышать ток срабатывания реле.

Для коммутации электрических цепей используются и перепады выходного напряжения, образующиеся на выходе спусковых устройств. На рис. 22 представлена схема спускового устройства, которое может быть использовано для бесшумной настройки приемника. Отрицательный перепад напряжения, снимаемый с анода лампы $Л_2$ спускового устройства после его срабатывания, прикладывается к сетке лампы первого каскада УНЧ и понижает ее потенциал настолько, что лампа $Л_4$ оказывается запертой и весь тракт УНЧ отключается от цепи детектора приемника. Срабатывание устройства происходит под действием сигнала помехи, когда напряжение, снимаемое с лампы $Л_1$, превысит определенный уровень. Этот уровень регулируется измене-

нием потенциала сетки лампы $Л_2$ при помощи потенциометра R_4.

Спусковое устройство ставится в режим работы, в котором второе состояние равновесия сохраняется только в течение времени действия сигнала (в нашем случае сигнала помехи) (см. рис. 2). Поэтому, когда сигнал не превышает значения $U_{пор1}$, лампа $Л_2$ заперта и потенциал сетки лампы $Л_4$ соответствует нормальному режиму работы в каскаде УНЧ. Нормальное смещение обеспечивается соответствующим подбором величин сопротивлений R_5 и R_6. Напряжение гистерезиса в таких схемах желательно иметь небольшим, что легко можно получить в спусковом устройстве с катодной связью.

Приведенная схема позволяет избавиться от сильных помех, превышающих уровень сигнала принимаемых станций. Выключатель *Вк* вводит в цепь сетки лампы $Л_2$ сопротивление R_2, и соотношение сопротивлений R_1, R_2 и R_3 становится таким, что устройство срабатывает от небольших изменений потенциала анода лампы $Л_1$, так как напряжение запуска для данного варианта схемы порядка 5 *в*. В этом режиме возможна бесшумная настройка приемника по индикатору лампы 6Е5С при выведенном регуляторе громкости.

10. ФОРМИРОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Спусковые устройства применяются также для формирования прямоугольных импульсов напряжения из напряжений любой формы. В качестве примера рассмотрим, как решается задача формирования прямоугольных импульсов из синусоидального напряжения и восстановления искаженных импульсов. Для этой цели используется устройство, схема которого показана на рис. 23. При указанных параметрах схемы амплитуда сформированных импульсов будет 120 *в* и длительность фронта $t_ф$ равна 3—4 *мксек* при входных емкостях нагрузки 120—150 *пф*. Требуемый режим работы подбирается путем изменения потенциала сетки левого (по схеме) триода $Л_1$ лампы 6Н15П, снимаемого с потенциометра R.

Схема будет нормально работать, если синусоидальное напряжение подавать на сетку или анод одной из ламп устройства. Допустим, что напряжение подается на сетку лампы $Л_1$ и что начальное положение равновесия соответствует запертой первой и отпертой второй лампе. По-

ложительная полуволна синусоидального напряжения (рис. 24), проходя первое пороговое значение ($U_{пор1}$), в момент времени t_1 (точка *1*) вызовет срабатывание устройства. Первая лампа отопрется, а вторая запрется. Напряжение на выходе устройства скачком увеличится до значения $U_{вых.макс}$.

В момент времени t_2 (точка *2*) входное напряжение проходит второе пороговое значение $U_{пор2}$ и устройство скачком возвращается в исходное состояние равновесия.

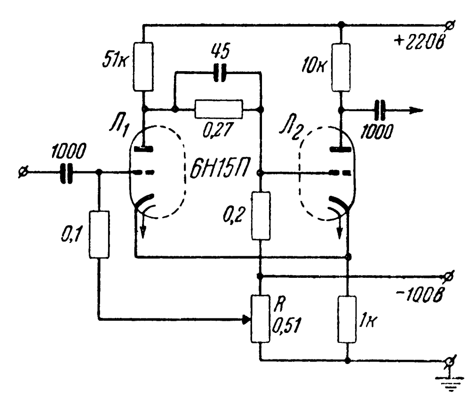


Рис. 23. Схема спускового устройства, применяемого для формирования прямоугольных импульсов из напряжения любой формы.

Напряжение на выходе уменьшается до значения $U_{вых.мин}$. Таким образом, за один период входного напряжения устройство сформирует один прямоугольный импульс.

Вторая положительная полуволна в момент времени t_3 (точка *3*) вызовет новое срабатывание устройства и т. д. Длительность сформированных таких образом положительного и отрицательного перепадов напряжения равна периоду синусоидального напряжения.

В противоположность импульсам, сформированным из синусоидального напряжения при помощи усилителя-ограничителя, крутизна положительного и отрицательного перепадов на выходе спускового устройства почти не зависит от свойств входного напряжения и определяется временем установления напряжения на выходе устройства. Чем ниже скорость изменения синусоидального напряжения в момент прохождения им пороговых точек динамической характери-

стики по сравнению со средней скоростью установления напряжения на выходе устройства, тем больший эффект дает применение спусковых устройств по сравнению с усилителями-ограничителями.

Требуемая крутизна фронтов импульса, сформированного при помощи спускового устройства, достигается при меньшем количестве ламп и других деталей. Этот случай соответствует низким частотам и малым амплитудам синусоидального напряжения. Для больших же частот и боль-

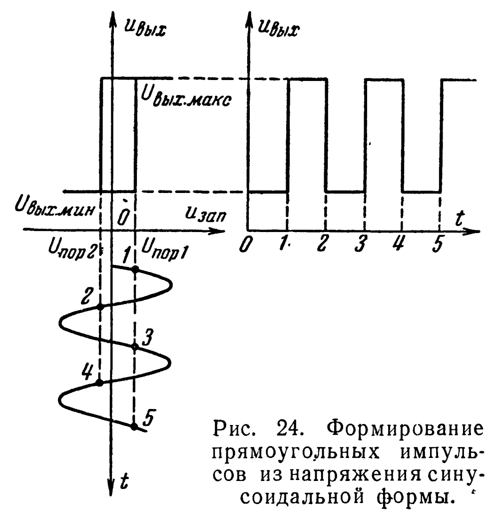


Рис. 24. Формирование прямоугольных импульсов из напряжения синусоидальной формы.

ших амплитуд, при которых скорость изменения синусоидального напряжения в момент прохождения им пороговых точек динамической характеристики приближается к средней скорости установления напряжения выхода в спусковом устройстве, применение последних нецелесообразно.

При формировании симметричных импульсов выходного напряжения необходимо, чтобы исходная рабочая точка, а следовательно, и ось ординат совпадали с осью симметрии динамической характеристики.

Для получения импульсов большой скважности необходимо строить спусковое устройство таким образом, чтобы напряжение гистерезиса U_{γ} было как можно меньше и исходная рабочая точка, а следовательно, и ось ординат были смещены влево относительно оси симметрии динамической характеристики.

В рассматриваемом устройстве (рис. 23) это достигается

путем введения в цепь сетки триода $Л_1$ отрицательного напряжения, снимаемого с потенциометра R.

Формировать таким способом импульсы сколько-нибудь значительной скважности (больше 10—20) трудно, так как для этого, как видно из рис. 25, необходимо, чтобы пороговые точки динамической характеристики проходились вершиной синусоиды, где скорость изменения напряжения мала. Поэтому незначительная нестабильность порогов срабатывания приводит к значительной девиации длительности сформированного импульса.

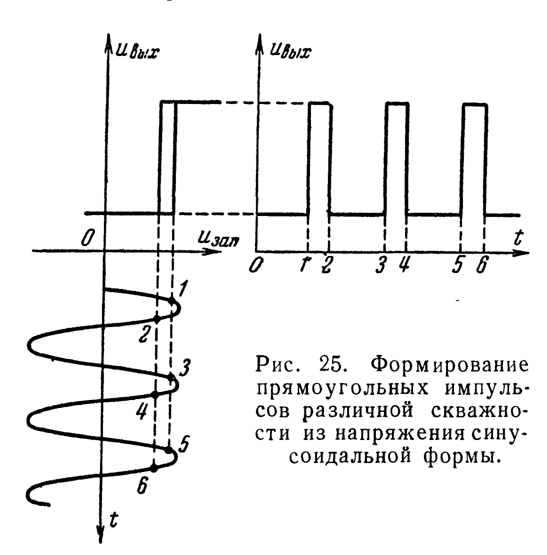


Рис. 25. Формирование прямоугольных импульсов различной скважности из напряжения синусоидальной формы.

Основным недостатком формирования импульсов из синусоидального напряжения спусковым устройством является нестабильность длительности импульсов в связи с изменением порога срабатывания при изменении режима, смене ламп и т. д.

Следует отметить, что спусковое устройство может в известных пределах решать задачу модуляции импульсов по длительности одновременно с формированием их. Для этого на сетку одной из ламп устройства подается синусоидальное напряжение определенной частоты, которое формирует прямоугольные импульсы, а на сетку другой лампы подается модулирующее напряжение, амплитуда которого должна быть достаточно малой, чтобы самостоятельно не изменить состояние равновесия устройства.

11. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ

Во многих случаях после прохождения различных трактов электронных устройств импульсы искажаются флуктуациями и помехами настолько, что дальнейшее их использование в таком виде становится невозможным. Например, при приеме и усилении импульсно-модулированных сигналов приемником импульсы часто искажаются до такой степени, что подача их в таком виде на демодулятор приводит к серьезным искажениям сигнала. Поэтому необходимо

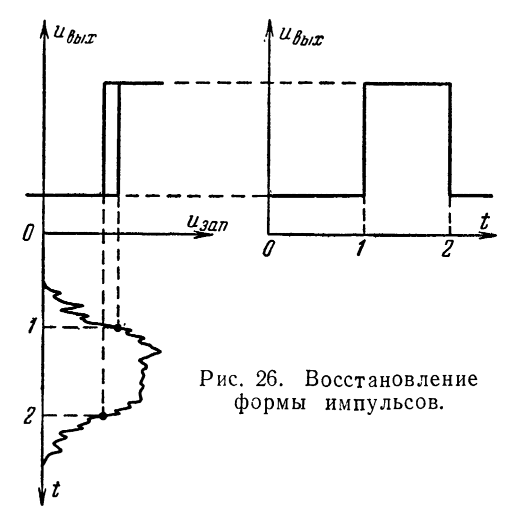


Рис. 26. Восстановление формы импульсов.

этот искаженный импульс преобразовать в импульс лучшей формы и постоянной амплитуды так, чтобы длительность полученного импульса мало зависела от искажений восстанавливаемого импульса.

Эта задача может быть наилучшим образом решена путем формирования прямоугольного импульса, длительность которого равна длительности искаженного импульса, измеренной на том участке его высоты, где крутизна фронтов максимальна. При решении этой задачи с помощью спускового устройства восстанавливаемые импульсы подаются на сетку или анод одной из ламп рассмотренного выше устройства (рис. 23). Режим подбирается таким образом, чтобы пороговые точки динамической характеристики проходились при максимальной скорости изменения фронтов восстанавливаемого импульса, т. е. при максимальной крутизне фронтов (рис. 26). Ось ординат должна быть смещена влево

относительно левой пороговой точки динамической характеристики. Чем меньше значение напряжения гистерезиса, тем легче подобрать такой режим, когда пороговые точки проходятся восстанавливаемым импульсом при максимальной крутизне фронтов. При больших значениях напряжения гистерезиса требуется большее предварительное усиление восстанавливаемых импульсов для осуществления отмеченных условий восстанавливания.

12. СЧЕТ (ДЕЛЕНИЕ) ЧИСЛА ИМПУЛЬСОВ

Спусковые устройства получили широкое применение для решения задачи счета импульсов, распределенных во времени по любому закону. На примере спускового устройства, схема которого изображена на рис. 27, рассмотрим, каким образом осуществляется счет однополярных импульсов.

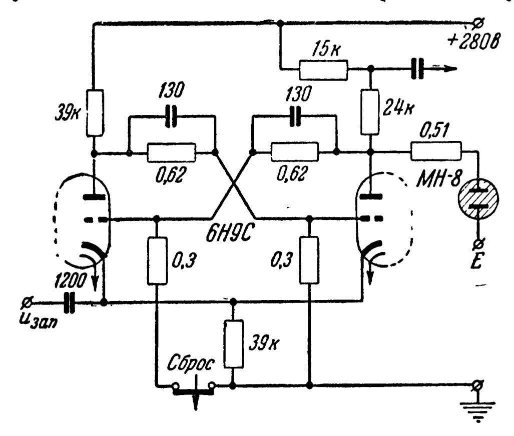


Рис. 27. Схема спускового устройства, применяемого для счета (деления) числа однополярных импульсов.

Для решения этой задачи необходимо, чтобы устройство срабатывало от каждого импульса. Это можно осуществить, если импульсы запуска подавать на катоды ламп. При таком запуске каждый импульс будет воздействовать на сетки обеих ламп одновременно.

На рис. 28 отражен случай, когда импульсы положительной полярности поступают на катоды ламп устройства. Будем считать, что вначале первая лампа заперта, а вторая отперта. Первый же импульс, переходя пороговое значение $U_{пор\,1}$ динамической характеристики, в момент времени t_1

вызовет срабатывание устройства. Первая лампа отопрется, а вторая запрется. Напряжение на выходе устройства скачком увеличится до значения $U_{вых.\,макс}$.

Второй импульс воздействует на отпертую лампу и, переходя пороговое значение в момент времени t_2, переведет устройство в исходное состояние равновесия. Первая лампа снова запрется, а вторая отопрется. Напряжение на выходе скачком уменьшится до значения $U_{мин}$. Таким образом, каждый положительный запускающий импульс будет изменять состояние равновесия устройства.

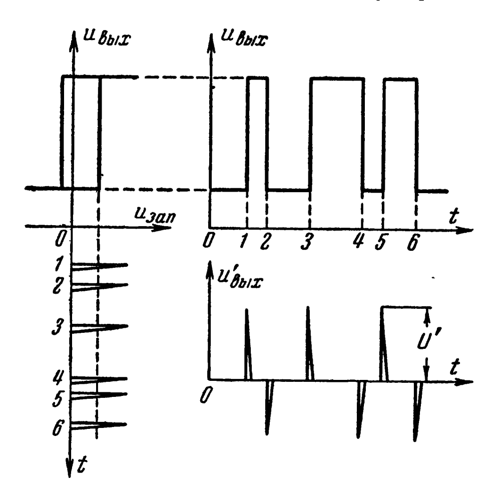


Рис. 28. Счет (деление) числа однополярных импульсов.

На каждые два импульса на входе получим на выходе устройства один сформированный импульс положительной или отрицательной полярности, длительность которого равна временному интервалу между соответствующими запускающими импульсами, т. е. в таком режиме работы устройство осуществляет деление числа импульсов на два.

Продифференцировав (укоротив) сформированные таким образом импульсы на выходе устройства, получим вдвое меньшее количество положительных коротких импульсов U' (рис. 28). Эти импульсы можно подать на вход следующего спускового устройства, которое должно быть чувствительно к запускающим импульсам только положительной полярности, и разделить их еще на два. Применение такой после-

довательности, состоящей из N спусковых устройств, позволяет разделить число импульсов в 2^N раз.

Изготовить электромеханический счетчик, способный регистрировать импульсы, отстоящие друг от друга меньше чем на 0,01 *сек*, затруднительно, а на сколько-нибудь значительно меньшее время и невозможно. Поэтому для счета числа импульсов, временной интервал между которыми мал, и применяется последовательность спусковых устройств, при помощи которых производится деление импульсов до значений, регистрируемых электромеханическим счетчиком. Весь этот комплекс спусковых устройств, включая электромеханический счетчик, называется пересчетным устройством.

Принципиальное отличие спускового устройства как делителя числа импульсов от всех других электронных делителей частоты заключается в том, что спусковое устройство может делить последовательность импульсов, распределенных во времени по любому закону. Счет импульсов может осуществляться с точностью до одного импульса. Спусковое устройство в указанном режиме работы представляет собой простейшее «запоминающее» устройство, так как регистрирует («запоминает») каждый запускающий импульс.

В различных областях науки и техники методы счета, основанные на использовании спусковых устройств, находят широкое применение. В экспериментальной ядерной физике, например, эти методы применяются для точного счета в течение заданного промежутка времени различных частиц, движущихся с различными скоростями. Спусковые устройства широко применяются в современных быстродействующих счетных машинах дискретного счета и ряде других устройств. В таком режиме работы устройство может также считать (делить) импульсы положительной и отрицательной полярности или импульсы только отрицательной полярности в зависимости от выбора режима работы и режима запуска устройства.

Спусковое устройство, схема которого приведена на рис. 27, применяется в качестве счетной ячейки в пересчетных устройствах. Запускающие импульсы положительной полярности подаются на общее катодное сопротивление триодов. Параллельно анодной нагрузке правого (по схеме) триода лампы 6Н9С включена через ограничивающее сопротивление (0,51 *Мом*) сигнальная неоновая лампочка (МН-8). Величина напряжения E подбирается таким образом, чтобы эта лампочка загоралась только при отпертом правом триоде. Перед началом счета нажимается кнопка

«Сброс» и сопротивление в цепи сетки левого триода на короткий промежуток времени отключается от «земли». В результате левый триод отпирается, а правый запирается, и неоновая лампочка гаснет.

При подаче первого положительного импульса на катоды левый триод запирается, а правый отпирается, и загорается неоновая лампочка. При этом на катоды лампы следующего подобного устройства поступает после дифференцирования отрицательный импульс, который не может вызвать его срабатывания. Второй положительный импульс запуска вызовет новое срабатывание устройства. Правая лампа запрется, и неоновая лампочка погаснет. На вход следующего спускового устройства приложится импульс положительной полярности, и на этот раз устройство сработает. Таким образом, зажженная неоновая лампочка сигнализирует о том, что импульс зарегистрирован только данным спусковым устройством. Такая система применяется для подсчета числа импульсов в пересчетных устройствах, не достигших электромеханического счетчика после окончания счета.

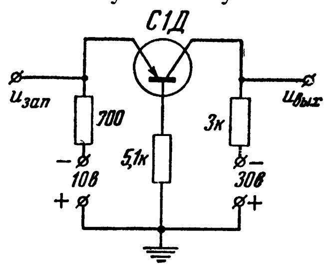


Рис. 29. Схема спускового устройства, применяемого для счета (деления) числа разнополярных групп однополярных импульсов.

При помощи спусковых устройств осуществляется также счет числа разнополярных групп однополярных импульсов. На примере устройства, схема которого приведена на рис. 29, рассмотрим и этот случай счета.

Допустим, начальное состояние равновесия соответствует минимальным токам $i_э$ и $i_к$. При этом $u_{вых}$ будет максимальным по абсолютной величине. Подсчитываемые группы импульсов подаются в цепь эмиттера.

Первый положительный импульс из группы положительных импульсов (рис. 30), переходя первое пороговое значение $U_{пор\,1}$ динамической характеристики, в момент времени t_1 переведет устройство в другое состояние равновесия, соответствующее максимальным значениям токов $i_э$ и $i_к$. Напряжение на выходе скачком уменьшится до значения $U_{вых.мин}$. Каждый последующий положительный импульс не изменит состояния равновесия устройства, так

как, сдвигая рабочую точку вправо от точки N (рис. 21), не может перейти второе пороговое значение характеристики.

Первый отрицательный импульс из группы отрицательных импульсов, переходя второе пороговое значение $U_{пор\,2}$, в момент времени t_2 вернет устройство в исходное состояние равновесия. Напряжение на выходе устройства увеличится снова до значения $U_{вых.макс}$. Каждый последующий

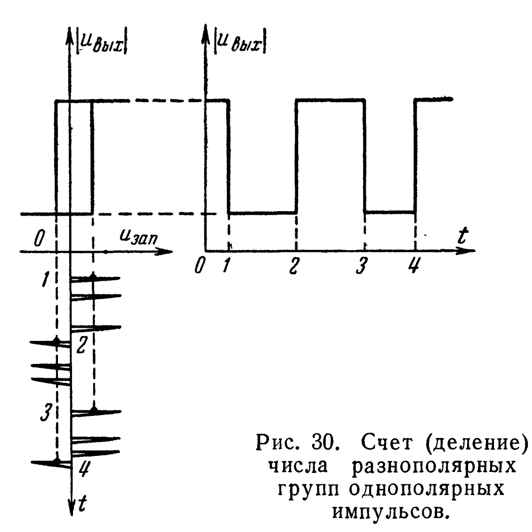


Рис. 30. Счет (деление) числа разнополярных групп однополярных импульсов.

отрицательный импульс не может изменить состояние равновесия устройства, так как, сдвигая рабочую точку влево от точки M (рис. 21), не может перейти пороговое значение напряжения $U_{пор\,1}$.

Таким образом, на каждые две группы разнополярных импульсов устройство сформирует один импульс положительной или отрицательной полярности, причем длительность его будет равна временному интервалу между первыми импульсами двух чередующихся групп разнополярных импульсов. Сформированные импульсы могут подаваться после укорочения на вход следующего спускового устройства, которое должно быть чувствительно к запускающим импульсам только положительной или только отрицательной полярности и делиться, таким образом, до значений, регистрируемых электромеханическим счетчиком.

В таком режиме работы рассмотренное спусковое

устройство регистрирует также отдельные импульсы чередующейся полярности.

Кроме перечисленных случаев, спусковые устройства находят и другие применения, например как регенеративное устройство для сравнения амплитуд, как специальный тип импульсного вольтметра и т. д.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАСЧЕТ СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

13. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА

Рассматривая в начале работу спускового устройства, мы не учитывали времени действия скачка, считая его мгновенным. В действительности же наличие паразитных емкостей в устройстве, которые принципиально неустранимы в конструкции, исключает возможность мгновенных скачков в системе, так как эффект запасания энергии паразитными емкостями и расходование ее при изменениях электрических состояний в системе предопределяет конечную крутизну фронтов перепадов напряжений на сопротивлениях устройства. В результате заряда и разряда паразитных емкостей, подключенных параллельно сопротивлениям устройства, в момент скачка потенциалы будут изменяться со скоростью, определяемой постоянными времени цепей, образованных паразитными емкостями и рабочими сопротивлениями, и срабатывание устройства будет происходить не мгновенно, а в течение конечного интервала времени.

Будем называть временем срабатывания устройства временной интервал $t_{сраб}$, в течение которого существует лавинообразный процесс изменения токов и напряжений в устройстве. Этот процесс будет существовать, пока коэффициент усиления в цепи обратной связи будет больше единицы.

Время срабатывания спускового устройства определяется многими параметрами и простой формулой через параметры устройства точно выражено быть не может. Обычно время срабатывания ориентировочно оценивается от десятых до сотых долей микросекунды для спусковых устройств, собранных на триодах, и от сотых до тысячных долей микросекунды для спусковых устройств, собранных на пентодах и полупроводниковых триодах. Длительность же

фронта выходного перепада напряжения больше времени срабатывания, так как обычно постоянная времени выходной цепи $T_{вых} \gg t_{сраб}$.

Будем различать два случая расчета спусковых устройств: на заданное разрешающее время и на заданную крутизну фронтов выходного перепада напряжения.

Под разрешающим временем $t_{разр}$ понимается минимальный временной интервал между двумя запускающими импульсами, которые еще регистрируются устройством. Так, если $t_{разр} = 1$ *мксек*, то это значит, что каждый из двух импульсов, отстоящих друг от друга на временной интервал, не меньший 1 *мксек*, вызовет четкое срабатывание устройства. Иногда разрешающее время оценивается в единицах частоты (герцах). Так, например, разрешающее время устройства в 1 *Мгц* $= 10^6$ *гц* равноценно $t_{разр} = \frac{1}{10^6} = 1$ *мксек*.

Разрешающее время определяется суммой времен установления напряжения на выходе устройства при переходе из одного устойчивого состояния в другое и обратно. Таким образом, чем выше крутизна фронтов выходных перепадов напряжения, тем меньше разрешающее время, тем выше разрешающая способность спускового устройства.

На разрешающее время будет оказывать значительное влияние также режим работы устройства и режим запуска, поэтому проектирование спусковых устройств на заданное разрешающее время осуществляется экспериментальным путем (ввиду сложности теоретического учета всех факторов, определяющих $t_{разр}$). Этот случай обычно соответствует такому режиму работы устройства, когда длительность фронта выходного напряжения и период запускающих импульсов—величины одного порядка.

В случае расчета на заданную длительность фронтов выходного напряжения будем считать, что период запускающих импульсов значительно больше длительности фронта выходного напряжения и постоянная времени выходной цепи устройства много больше времени срабатывания, т. е. $T_{вых} \gg t_{сраб}$, что имеет место в большинстве практических случаев. При этом переходными процессами, происходящими в устройстве в момент срабатывания, можно пренебрегать, так как скорость нарастания и спада выходного

напряжения в этом случае определяется в основном постоянной времени $T_{вых}$.

Будем рассчитывать спусковые устройства на получение заданных: U — амплитуды выходных перепадов напряжения, $t_ф$ — активной длительности фронта (положительного перепада) или $t_с$ — активной длительности среза (отрицательного перепада напряжения).

Необходимость получения заданных U, $t_ф$ или $t_с$ выходных перепадов напряжения от спускового устройства в значительной степени определяет выбор того или иного типа электрического прибора. Так, если требуется получить значительную амплитуду U выходных перепадов напряжения при достаточно малых $t_ф$ и $t_с$, целесообразно строить устройство на электронно-вакуумных лампах. Полупроводниковые триоды позволяют получить предельно малые длительности $t_ф$ и $t_с$. Использование газонаполненных ламп в спусковых устройствах обычно не дает возможности получения значений $t_ф$ и $t_с$ меньше нескольких десятков микросекунд и т. д.

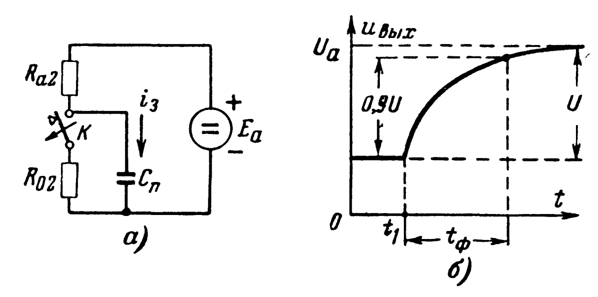


Рис. 31.

а — эквивалентная схема цепи выхода спускового устройства для определения активной длительности фронта выходного импульса; *б* — график изменения анодного напряжения выходной лампы после запирания ее в момент времени t_1 (размыкание ключа *К*).

Полагая, что $T_{вых} \gg t_{сраб}$, будем считать, что изменение проводимости выходного плеча (лампы или полупроводникового триода) происходит мгновенно и длительности $t_ф$ и $t_с$ определяются постоянной времени $T_{вых}$.

На примере схем спусковых устройств, построенных на электронных лампах, получим соотношения, определяющие необходимый перепад тока в выходном плече устройства для получения перепада напряжения заданной амплиту-

ды U и заданной активной длительности фронта $t_ф$ или среза t_c.

На рис. 31,*а* и 32,*а* изображены эквивалентные схемы цепи выхода спускового устройства, построенного на электронных лампах. Лампа выходного плеча $Л_2$ заменена ключом *К*, замыкание и размыкание которого имитирует мгновенное запирание или отпирание лампы.

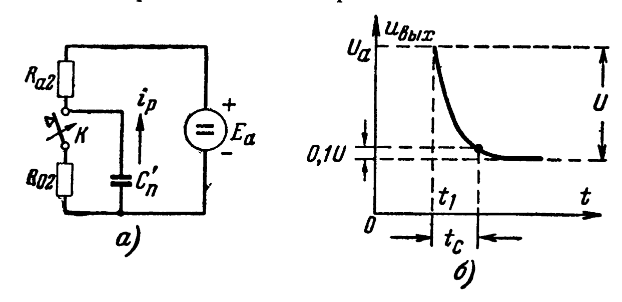


Рис. 32.

а — эквивалентная схема цепи выхода спускового устройства для определения активной длительности среза выходного импульса; *б*—график изменения анодного напряжения выходной лампы после отпирания ее в момент времени t_1 (замыкание ключа *К*).

При запирании выходной лампы (размыкание ключа *К* на рис. 31,*а*) напряжение на выходе устройства будет нарастать по мере заряда паразитной выходной емкости $C_п$ через сопротивление R_{a2}. Скорость этого заряда будет определяться постоянной времени заряда $T_з = C_п R_{a2}$. Емкость $C_п$ определится как

$$C_п = C_н + C_{a\text{-}к2} + C_2 + C_м, \qquad (12)$$

где $C_н$ — входная емкость нагрузки;

$C_{a\text{-}к2}$ — выходная емкость лампы $Л_2$;

C_2 — емкость плеча связи;

$C_м$ — емкость монтажа.

Емкость цепи связи C_2 после открывания лампы противоположного плеча окажется подключенной к „земле" через малое сопротивление $R_{c\text{-}к}$ участка сетка—катод отпертой лампы. Поэтому она также входит в суммарную паразитную выходную емкость. Для получения малого времени $t_ф$ желательно брать величину емкости C_2 цепи связи, по возможности, малой, но такой, чтобы $\beta' \approx 1$ (см. стр. 20).

Напряжение на выходе устройства после запирания лампы $Л_2$ выходного плеча нарастает по закону

$$u_{вых}(t) = U\left(1 - e^{-\frac{t}{T_з}}\right),$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Условно измеряя, как это принято, активную длительность фронта $t_ф$ на уровне $0{,}9U$ (рис. 31,*б*), получим:

$$t_ф = 2{,}3 R_{a2} C_п = 2{,}3 T_з. \qquad (13)$$

Из последней формулы видно, что для уменьшения величины $t_ф$ необходимо уменьшать значения $C_п$ и R_{a2}. Уменьшить емкость $C_п$ можно, выбирая лампы с малыми паразитными емкостями, используя нагрузочные устройства с малой входной емкостью, а также рациональным монтажом.

Уменьшение времени $t_ф$ за счет изменения сопротивления R_{a2} влечет за собой уменьшение коэффициента усиления каскада и уменьшение амплитуды выходного перепада напряжения. Поэтому для спусковых устройств целесообразно применять сильноточные лампы с большой крутизной, которые позволяют при малых значениях сопротивления R_{a2} получить достаточную амплитуду выходного перепада напряжения.

Дальнейшее уменьшение сопротивления R_{a2}, а следовательно, и $t_ф$ возможно за счет уменьшения U, но величина его должна быть такой, чтобы при отпирании лампы выходного плеча лампа противоположного плеча спускового устройства надежно запиралась. С этой точки зрения желательно применять лампы с малым значением напряжения запирания E_{c0} по абсолютной величине, т. е. с большим коэффициентом усиления μ. Это выгодно еще и потому, что время срабатывания тем меньше, чем меньше значение E_{c0}.

По заданным величинам U и $t_ф$ необходимо выбрать тип лампы. Поскольку значение сопротивления R_{a2} в начале расчета неизвестно, то, учитывая, что $U = I_{a02} R_{a2}$, запишем формулу (13) в виде:

$$t_ф = 2{,}3 \frac{U}{I_{a02}} C_п. \qquad (13')$$

Отсюда необходимый ток «покоя», который должна развивать лампа в одном из состояний устойчивого равновесия:

$$I_{a02}=2,3\frac{UC_п}{t_ф}. \qquad (14)$$

Из этих формул видно, что чем больше значение тока I_{a02}, тем меньшую величину $t_ф$ мы можем получить при прочих равных условиях.

При отпирании лампы $Л_2$ (замыкание ключа $К$ на рис. 32,*а*) напряжение на аноде ее падает по мере разряда паразитной выходной емкости $C'_п$ через эквивалентное сопротивление:

$$R_э=\frac{R_{a2}R_{02}}{R_{a2}+R_{02}},$$

где R_{02} — сопротивление отпертой лампы постоянному току.

При этом

$$u_{вых}(t)=Ue^{-\frac{t}{T_p}},$$

где постоянная времени разряда $T_p=C'_п R_э$.

Активная длительность среза t_c, измеренная на уровне $0,1U$ (рис. 32,*б*), определится формулой

$$t_c=2,3C'_п R_э=2,3T_p. \qquad (15)$$

При отпирании лампы $Л_2$ емкость C_2 практически не влияет на величину t_c, так как лампа $Л_1$ запирается и емкость C_2 оказывается нагруженной на высокоомное сопротивление $\left(\frac{R_c(R_2+R_э)}{R_c+R_2+R_э}\right)$, в результате чего можно считать, что

$$C'_п=C_н+C_{a\text{-}к2}+C_м. \qquad (16)$$

Так как $R_э<R_{a2}$ и $C'_п<C_п$, то и длительность среза меньше длительности фронта.

Вначале расчета величины сопротивлений R_{a2} и R_{02} неизвестны, поэтому для выбора типа ламп по заданным величинам U и t_c представим формулу (15) в более удобном виде. Учитывая, что $R_{a2}=\frac{U}{I_{a02}}$ и $R_{02}=\frac{U_{a\text{-}к2}}{I_{a02}}$, где $U_{a\text{-}к2}$—на-

пряжение между анодом и катодом отпертой лампы, из формулы (15) определим:

$$I_{a02} = 2{,}3 \frac{C'_n U U'_{a\text{-}к2}}{t_c (U + U_{a\text{-}к2})}. \qquad (17)$$

Величина $U'_{a\text{-}к2}$ в начале расчета принимается ориентировочно.

Приведенные соотношения справедливы для спусковых устройств, построенных на вакуумных усилительных лампах. При оценке длительности фронта и среза выходных перепадов напряжения в спусковых устройствах, построенных на газонаполненных лампах, необходимо учитывать время развития и прекращения самостоятельного газового разряда, так как оно может быть соизмеримо с постоянной времени выходной цепи.

Для спусковых устройств, построенных на полупроводниковых триодах, в эквивалентной схеме выхода необходимо учитывать то обстоятельство, что при максимальном потенциале коллектора по абсолютной величине проводимость триода не равна нулю. Поэтому и перепад токов $\Delta i_к$ в выходной коллекторной цепи, необходимый для обеспечения заданных U, $t_ф$ или t_c, определится как $\Delta i_к = i_{к.макс} - i_{к.мин}$.

Для уверенного расчета спусковых устройств, построенных на газонаполненных лампах и полупроводниковых триодах, необходимо располагать характеристиками тех приборов, которые непосредственно используются в устройстве. Следует отметить, что в спусковом устройстве (рис. 7) от величины тока в цепи поджигающего электрода зависит степень начальной ионизации газа. Поэтому, регулируя этот ток изменением сопротивления R_1, можно изменять чувствительность устройства к сигналам запуска.

14. РАСЧЕТ СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА С АНОДНО-СЕТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ И ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ СМЕЩЕНИЯ

При расчете спусковых устройств, построенных на электронных лампах, соотношение сопротивлений R и R_c цепей связи подбирается таким образом, чтобы напряжение $U'_{c\text{-}к}$ между сеткой и катодом отпертой лампы (измеренное при вынутых лампах) было положительным. Тогда за счет протекания сеточных токов через цепь R $R_{c\text{-}к}$ (где $R_{c\text{-}к}$ —

сопротивление промежутка сетка—катод отпертой лампы) практически все напряжение упадет на сопротивлении R, так как $R \gg R_{с\text{-}к}$, поэтому напряжение $U'_{с\text{-}к}$ будет близко к нулевому значению и с несущественной погрешностью его можно считать равным нулю.

Такой режим работы спускового устройства выгоден по двум причинам. Во-первых, при $U'_{с\text{-}к} \approx 0$ мы можем использовать лампы в режиме больших анодных токов, что часто бывает необходимо для получения заданных величин

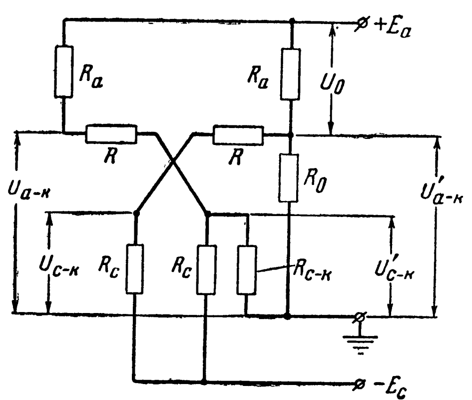


Рис. 33. Эквивалентная схема спускового устройства с анодно-сеточными связями и внешним источником смещения (см. рис. 10).

$t_ф$ и $t_с$. Во-вторых, в таком режиме работы достигается наилучшая надежность работы устройства, так как при изменении напряжения питающих источников, смене ламп и т. д. напряжение за счет сеточного ограничения автоматически поддерживается близким к нулевому значению и проводящая лампа будет надежно отперта.

На рис. 33 представлена эквивалентная схема рассмотренного ранее спускового устройства (рис. 10). Отпертая лампа заменена сопротивлениями R_0 и $R_{с\text{-}к}$, где R_0 — сопротивление лампы постоянному току при $U'_{с\text{-}к} \approx 0$, а $R_{с\text{-}к}$ — сопротивление между сеткой и катодом отпертой лампы.

После выбора типа лампы и величины тока $I_{а0}$, необходимого для обеспечения заданной длительности фронта или среза, определим величины сопротивлений $R_а$, R и $R_с$.

Сопротивление R_a определяется по формуле

$$R_a = \frac{U}{I_{a0}}. \tag{18}$$

Соотношение сопротивлений R и R_c подбирается так, чтобы в режиме «покоя» одна лампа была отперта, а другая заперта. Для того чтобы отпертая лампа была надежно отперта, необходимо иметь напряжение между сеткой и катодом отпертой лампы, измеренное при вынутых лампах, положительным, т. е. $U'_{c\text{-}\kappa} > 0$. Тогда после прогрева ламп за счет сеточного ограничения напряжение понизится приблизительно до нулевого значения и будет фиксировано на этом уровне. Это обеспечивается при выполнении неравенства

$$R < \frac{E_a}{|E_c|} R_c - R_a. \tag{19}$$

Для того чтобы запертая лампа была надежно заперта, необходимо, чтобы напряжение $U_{c\text{-}\kappa}$ (рис. 33) запертой лампы было ниже напряжения запирания E_{c0}. Это обеспечивается при выполнении неравенства

$$\frac{|E_c|}{R_c + R + \dfrac{R_a R_0}{R_a + R_0}} \left(\frac{R_a R_0}{R_a + R_0} + R \right) > \frac{E_a \dfrac{R_0}{R_a + R_0}}{R + R_c} R_c + |E_{c0}|.$$

Так как $R + R_c \gg \dfrac{R_a R_0}{R_a + R_0}$, то с несущественной погрешностью последнее неравенство представим в виде:

$$R > \frac{\dfrac{|E_{c0}|}{E_a} + \dfrac{R_0}{R_0 + R_a}}{\dfrac{|E_c|}{E_a} - \dfrac{|E_{c0}|}{E_a}} R_c - \frac{|E_c|}{E_a} \frac{R_a R_0}{R_0 + R_a}. \tag{20}$$

Искомые сопротивления R и R_c должны удовлетворять двум неравенствам — (19) и (20). Поскольку имеется множество значений R и R_c, удовлетворяющих этим неравенствам, найдем решение графически. Заменим знаки неравенств в выражениях (19) и (20) знаками равенств и проведем в прямоугольных координатах линии *1* и *2*, соответствующие полученным таким образом равенствам (рис. 34). Все точки плоскости, лежащие ниже линии *1*, удовлетво-

ряют неравенству (19), а все точки плоскости, лежащие выше линии *2*, удовлетворяют неравенству (20).

Согласно сделанному в самом начале допущению написанные уравнения справедливы в том случае, если $R \gg R_a$. Считая это неравенство приемлемым, когда $R \geqslant 10R_a$, проведем на графике (рис. 34) линию $R_{мин} = 10R_a$ (линия *3*). Любые значения сопротивлений R^* и R_c^*, взятые в области, заключенной между линиями *1*, *2* и *3*, удовлетворяют неравенствам (19) и (20). Назовем эту область областью возможных значений сопротивлений R и R_c.

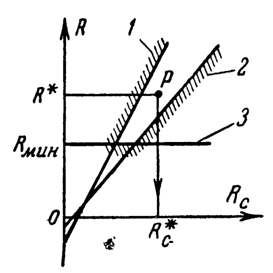


Рис. 34. Диаграмма области возможных значений сопротивлений R и R_c спускового устройства с анодно-сеточными связями и внешним источником смещения.

Удобство такого решения, кроме его простоты, заключается в том, что оно позволяет видеть сразу все комбинации сопротивлений R и R_c, удовлетворяющих исходным расчетным условиям.

Пользуясь графиком (рис. 34), легко подобрать нужную комбинацию сопротивлений из имеющихся под рукой. Если для расчета использованы усредненные характеристики ламп и величины применяемых сопротивлений не измерены, то легко учесть в выражениях (19) и (20) возможный разброс параметров ламп и величин сопротивлений.

Путем приравнивания наклонов линии *1* и *2* можно из выражений (19) и (20) определить минимально возможное значение анодных сопротивлений.

Для запуска устройства требуется тем меньшая амплитуда положительного запускающего импульса, чем ближе рабочая точка P (рис. 34), определяющая R^* и R_c^* в области возможных значений, лежит к линии *2*, и тем меньшая амплитуда отрицательного импульса, чем ближе рабочая точка P лежит к линии *1*.

15. РАСЧЕТ СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА С АНОДНО-СЕТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ И КАТОДНЫМ СМЕЩЕНИЕМ

На рис. 35 изображена эквивалентная схема ранее рассмотренного спускового устройства (рис. 11), соответствующая запертой первой и отпертой второй лампе. На схеме

R_0 — сопротивление лампы постоянному току, а $R_{c\text{-}к}$ — сопротивление промежутка сетка—катод отпертой лампы.

После выбора лампы и определения тока I_{a0} необходимо определить сопротивления R_a, $R_к$, R и R_c. Сопротивление R_a определяется по формуле (18). Если напряжение источника анодного питания E_a известно, то, как видно из рис. 35,

$$U_к = E_a - (U'_{a\text{-}к} + U)$$

и

$$R_к = \frac{U_к}{I_{a0}}. \tag{21}$$

Соотношение сопротивлений R и R_c подбирается таким образом, чтобы в режиме «покоя» одна из ламп была отперта, а другая заперта.

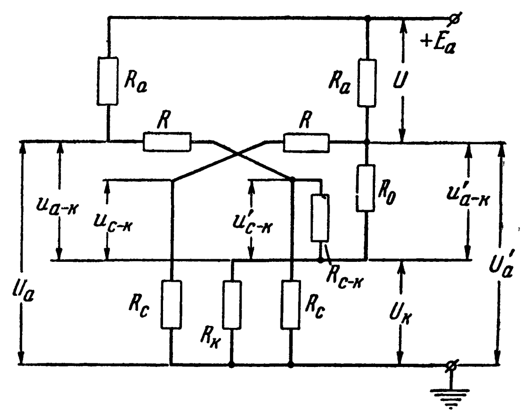


Рис. 35. Эквивалентная схема спускового устройства с анодно-сеточными связями и катодным смещением (рис. 11).

Отпертая лампа будет надежно отперта, если значения сопротивления R и R_c удовлетворяют неравенству

$$U_a \frac{R_c}{R + R_c} > U_к$$

или (так как $U_a \approx E_a$) $E_a \frac{R_c}{R + R_c} > U_к$.

Представим последнее неравенство в виде:

$$R < \left(\frac{E_a}{U_к} - 1\right) R_c \tag{22}$$

или в виде:

$$R < \left(\frac{R_a + R_0}{R_к}\right) R_c. \tag{23}$$

Запертая лампа будет надежно заперта, если выполняется неравенство

$$U_к > U'_a \frac{R_c}{R + R_c} + |E_{c0}|.$$

Представим последнее неравенство в виде:

$$R > \left(\frac{E_a - U}{U_к - |E_{c0}|} - 1\right) R_c \tag{24}$$

или в виде:

$$R > \frac{R_0 + \frac{|E_{c0}|}{E_a}(R_a + R_0 + R_к)}{R_к - \frac{|E_{c0}|}{E_a}(R_a + R_0 + R_к)} R_c. \tag{25}$$

Искомые сопротивления R и R_c должны удовлетворять неравенствам (22) и (24) или (23) и (25). Поскольку имеется множество значений, удовлетворяющих этим неравенствам, найдем решение графически (рис. 36). Линия *1* соответствует выражению (22) или (24), а линия *2* — выражению (23) или (25) после замены знаков неравенств в этих выражениях на знаки равенств. Линия *3*, как и в предыдущем случае, определяет $R_{мин} = 10R_a$.

Значения сопротивлений R и R_c, взятые в зоне возможных значений, заключенной между линиями *1*, *2* и *3*, удовлетворяют расчетным неравенствам. Как показывает опыт, при любых значениях сопротивлений R^* и R_c^*, взятых в области возможных значений, спусковое устройство работает устойчиво.

Если в качестве ламп устройства применяются пальчиковые лампы, то граница области возможных значений расширяется вправо (линия *4*). Смещение линии *2* вызвано тем, что на сетках ламп образуется добавочный отрица-

тельный потенциал, обусловленный так называемыми электронами налета, которые в пальчиковых лампах заметно проявляют себя.

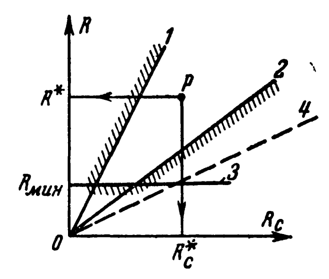


Рис. 36. Диаграмма области возможных значений сопротивлений R и R_c спускового устройства с анодно-сеточными связями и катодным смещением.

Из неравенств (23) и (25) видно, что чем меньше значение сопротивлений R_a, тем меньше угол между линиями *1* и *2*, тем уже область возможных значений. Найдем минимально возможное значение анодного сопротивления $R_{а.мин}$. Для этого приравниваем наклоны линий *1* и *2*. При этом область возможных значений превратится в линию, все точки которой удовлетворяют неравенствам (23) и (25). Наклоны линий *1* и *2* будут одинаковы, когда коэффициенты при сопротивлении R_c в выражениях (23) и (25) будут равны, т. е. когда

$$\frac{R_{а.мин}+R_0}{R_к}=\frac{R_0+\frac{|E_{c0}|}{E_a}(R_{а.мин}+R_0+R_к)}{R_к-\frac{|E_{c0}|}{E_a}(R_{а.мин}+R_0+R_к)}.$$

Так как $\frac{|E_{c0}|}{E_a}\leqslant 1$ и обычно $R_{а.мин}<(R_0+R_к)$, то в правой части этого равенства с несущественной погрешностью можно для простоты конечной формулы пренебречь сопротивлением $R_{а.мин}$. Тогда

$$\frac{R_{а.мин}+R_0}{R_к}\approx\frac{R_0+\frac{|E_{c0}|}{E_a}(R_0+R_к)}{R_к-\frac{|E_{c0}|}{E_a}(R_0+R_к)}.$$

Отсюда

$$R_{а.мин}=\left(\frac{1+\frac{|E_{c0}|}{E_a}\,\frac{R_0+R_к}{R_0}}{1-\frac{\frac{|E_{c0}|}{E_a}(R_0+R_к)}{R_к}}-1\right)R_0. \qquad (26)$$

Из последней формулы видно, что значение $R_{a.мин}$ может быть взято тем меньше, чем меньше величина $\frac{|E_{c0}|}{E_a} \approx D$ (где D — проницаемость лампы), т. е. чем больше коэффициент усиления μ лампы, а также чем меньше значение сопротивления постоянному току лампы R_0.

16. РАСЧЕТ СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА С КАТОДНОЙ СВЯЗЬЮ

Рассмотрим соотношения, необходимые для расчета спускового устройства, изображенного на рис. 16.

Значение сопротивления R_{a2} и тип лампы выбираются из условий обеспечения заданных величин U и $t_ф$. Величина сопротивления $R_к$ выбирается, как отмечалось выше, так, чтобы выполнялось неравенство

$$I_{a02}R_к > |E_{c01}|. \tag{27}$$

Лампа $Л_2$ будет надежно отперта при выполнении неравенства

$$R_1 < \frac{1}{\frac{E_a + |E_c|}{E_a - I_{a02}R_к} - 1} R_{c2} - R_{a1}. \tag{28}$$

В реальных схемах величины сопротивлений R_1 и R_{c2} выбираются достаточно большими, так что обычно выполняются неравенства

$$R_1 \gg \frac{R_{a1}(R_{01} + R_к)}{R_{a1} + R_{01} + R_к} \text{ и } R_{c2} \gg \frac{R_{a1}(R_{01} + R_к)}{R_{a1} + R_{01} + R_к},$$

где R_{01} — сопротивление отпертой лампы $Л_1$ постоянному току. Поэтому условие надежного запирания лампы $Л_2$ можно записать в виде:

$$\frac{|E_c|}{R_1 + R_{c2}} R_1 > \frac{(E_a - I_{a1}R_{a1})}{R_1 + R_{c2}} R_{c2} + |E_{c02}| - I_{a1}R_к.$$

Так как $I_{a1}R_к < |E_{c02}|$, то, пренебрегая величиной $I_{a1}R_к$, что пойдет в запас, запишем последнее неравенсто в виде:

$$R_1 > \frac{E_a - I_{a1}R_{a1} + |E_{c02}|}{|E_c| - |E_{c02}|} R_{c2}. \tag{29}$$

Для определения величин сопротивлений R_1 и R_{c2} удобно произвести графическое решение неравенств (28) и (29), так как это было сделано в расчете спусковых устройств с анодно-сеточными связями. Но для решения этих уравнений необходимо знать величины I_{a1} и R_{a1}.

Величиной сопротивления R_{a1} задаются в начале расчета, после чего находят величину тока I_{a1}, как это обычно делается для каскада с катодной нагрузкой.

Амплитуда перепада напряжения на аноде лампы $Л_2$ определится из формулы (18):

$$U = I_{a02} R_{a2},$$

а амплитуда перепада напряжения на катоде будет:

$$U_к = (I_{a02} + I_{a1}) R_к. \quad (30)$$

Емкости C цепей связи в рассматриваемых спусковых устройствах выбираются, как уже отмечалось, из расчета получения минимального $t_ф$, но такими, чтобы $\beta' \approx 1$ (см. стр. 20). Обычно $C = (10 \div 100)$ *пф*.

17. РАСЧЕТ СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА НА ТОЧЕЧНОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ТРИОДЕ

Для расчета спускового устройства, схема которого дана на рис. 20,*в*, необходимо располагать вольт-амперной характеристикой (рис. 21). Построение вольт-амперной характеристики этого устройства путем вычисления координат ее точек затрудняется тем обстоятельством, что статические характеристики точечного триода не аппроксимируются простыми функциями.

Для построения входной вольт-амперной характеристики применяют следующие методы: графический метод, метод аппроксимации статических характеристик линейно-ломаными прямыми и метод последовательного представления первоначальной схемы устройства несколькими эквивалентными схемами, которые отображают процессы в устройстве на отдельных этапах ее работы.

Так как современные полупроводниковые триоды обладают большим разбросом параметров, то в практических случаях целесообразнее вместо снятия статических характеристик триода, необходимых для расчета, снимать непосредственно вольт-амперные характеристики.

Эти характеристики могут быть сняты путем измерения величины потенциала $u_э$, который получается при разных значениях тока $i_э$, задаваемого генератором тока, включенным в цепь эмиттера. Под генератором тока понимается генератор, обладающий весьма большим внутренним сопротивлением.

Применительно к рассматриваемому устройству сопротивление $R_э$ должно быть весьма большим. Изменение тока может быть достигнуто изменением величины $E_э$ при $R_э = \text{const}$ или изменением величины $R_э$ при $E_э = \text{const}$.

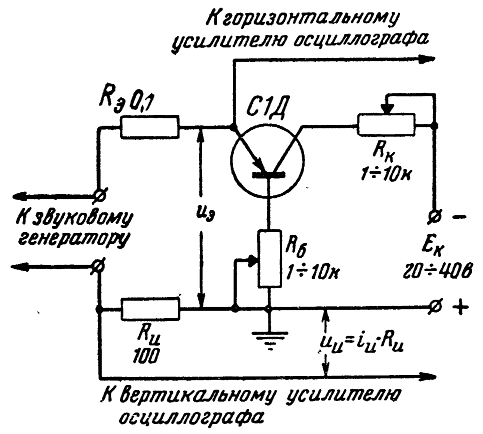


Рис. 37. Схема для снятия вольт-амперных характеристик точечных полупроводниковых триодов осциллографическим методом.

Вольт-амперные характеристики для разных значений сопротивлений $R_б$ и $R_к$ можно снять по точкам при помощи приборов или получить осциллографическим путем.

На рис. 37 изображена схема для снятия вольт-амперных характеристик осциллографическим методом. Напряжение переменной э. д. с., снимаемое с эмиттера, и напряжение с измерительного сопротивления $R_и = 100$ *ом*, пропорциональное току $i_э$, подаются на отклоняющие пластины электронного осциллографа, на экране которого можно наблюдать вид вольт-амперной характеристики. После определения масштабов и положения осей характеристика вполне пригодна для дальнейших расчетов.

Следует отметить, что положение вольт-амперной характеристики относительно оси ординат значительно зависит от

температурных условий работы устройства. При изменении температуры возникает опасность, что вследствие сдвига характеристики (пунктирная кривая на рис. 21) нагрузочная линия не будет пересекать все ее три ветви и устройство уже не будет обладать двумя устойчивыми состояниями равновесия. Для устранения этого явления необходимо применять температурную компенсацию, позволяющую изменять напряжение таким образом, чтобы нагрузочная линия всегда пересекала все три ветви вольт-амперной характеристики независимо от температурных условий работы устройства.

Используя осциллографический метод с незначительными затратами времени, можно получить необходимое семейство вольт-амперных характеристик при различных $R_б$ и $R_к$. Выбор режима спускового устройства производится так, как это было изложено ранее.

При расчете таких устройств на заданные значения U, $t_ф$ или $t_с$, необходимо исходить от принимаемой заранее величины разности токов $i_{к.макс} - i_{к.мин}$. Такой расчет усложнен тем, что требует учета подвижности носителей зарядов в триоде. Поэтому ограничимся изложенными расчетными соотношениями. Отметим только, что крутизну фронта и среза выходного перепада напряжения в спусковых устройствах, построенных на специальных полупроводниковых триодах, получают значительно выше, чем у спусковых устройств, построенных на электронных лампах.

18. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрим числовые примеры расчета спусковых устройств.

Пример 1. Рассчитать спусковое устройство, предназначенное для формирования прямоугольных перепадов напряжения. Сигналы запуска—импульсы положительной полярности. Требуемая амплитуда выходного напряжения $U = 100$ *в* при длительности фронта $t_ф = 2{,}5$ *мксек*. Напряжение источника анодного питания $E_a = 240$ *в*. Входная емкость нагрузки $C_н = 60$ *пф*.

Примерный порядок расчета:

1. Выбираем по соображениям, изложенным на стр. 21—22, симметричную схему спускового устройства с анодно-сеточными связями и с катодным смещением (рис. 11).

Поскольку выбранная схема симметрична, то расчет проводим для одного плеча спускового устройства.

2. Выберем тип лампы. Для этого подсчитываем по формуле (14) величину тока I_{a0}, который должна обеспечивать отпертая лампа в режиме «покоя».

Предварительно ориентировочно подсчитываем значение $C_п$ по формуле (12):

$$C_п = 60 + 30 + 5 + 5 = 100 \text{ пф},$$

где $C_{а\text{-}к} = 5$ *пф*, $C_м = 5$ *пф* и $C = 30$ *пф* приняты ориентировочно.

Тогда

$$I_{a0} = 2{,}3 \frac{100 \cdot 100 \cdot 10^{-12}}{2{,}5 \cdot 10^{-6}} = 9{,}2 \text{ ма}.$$

Принимаем с запасом $I_{a0} = 10$ *ма*.

Такой ток позволяет обеспечить лампа 6Н15П ($i_a = I_{a0} = 10$ *ма* при $U'_{а\text{-}к} \approx 80$ *в* и $U_{с\text{-}к} \approx 0$).

Чтобы окончательно остановиться на этом типе лампы, проверим, не превышает ли мощность, рассеиваемая на аноде, допустимую для этой лампы величину. Эту проверку произведем для наиболее тяжелого случая работы устройства, когда запускающие импульсы по какой-либо причине отсутствуют и одна из ламп устройства постоянно открыта:

$$10 \cdot 10^{-3} \cdot 80 = 0{,}8 \text{ вт} < P_{а.доп} = 1{,}6 \text{ вт},$$

т. е. мощность рассеивания не превышает допустимую величину.

Для лампы 6Н15П величина емкости $C_{а\text{-}к} = 0{,}4$ *пф*, в расчете же принято $C_{а\text{-}к} = 5$ *пф*. Поскольку значение емкости $C_м$ принято ориентировочно, оставляем прежнее значение $C_п$, что пойдет в запас. Так как емкость $C_{с\text{-}к} = 2{,}2$ *пф* выбранной лампы много меньше принятой емкости C, то значение $\beta' \approx 1$, что и требуется для выполнения условия развития скачка.

3. Определяем по формуле (18) величину сопротивления анодной нагрузки

$$R_a = \frac{U}{I_{a0}} = \frac{100}{10 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ ком}.$$

4. Определяем значение напряжения $U_к$ по графику рис. 38:

$$U_к = E_a - U'_{а\text{-}к} - U = 240 - 80 - 100 = 60 \text{ в}.$$

5. Определяем величины сопротивления $R_к$ по формуле (21):

$$R_к = \frac{U_к}{I_{a0}} = \frac{60}{10 \cdot 10^{-3}} = 6 \text{ ком}.$$

6. Величины сопротивлений R и R_c должны удовлетворять неравенствам (22) и (24):

$$R < \left(\frac{240}{60} - 1\right) R_c \text{ и } R > \left(\frac{240 - 100}{60 - 7} - 1\right) R_c.$$

Заменяя знаки неравенств в этих выражениях на знаки равенств, проведем в системе координат $R - R_c$ прямые линии *1* и *2* (рис. 39) соответственно $R = 3R_c$ и $R = 1{,}64R_c$, а также линию *3* соответственно $R_{мин} = 10R_a = 10 \cdot 10 = 100$ *ком*.

Любая точка, взятая в области возможных значений сопротивлений R и R_c, определит их величины.

Выбираем рабочую точку (точка P) в середине области возможных значений, что дает наиболее стабильный режим работы. При этом получим:

$$R = 390 \text{ ком и } R_c = 180 \text{ ком.}$$

Пример 2. Рассчитать спусковое устройство, предназначенное для формирования прямоугольных перепадов напряжения из напряжения синусоидальной формы. Требуемая амплитуда выходного

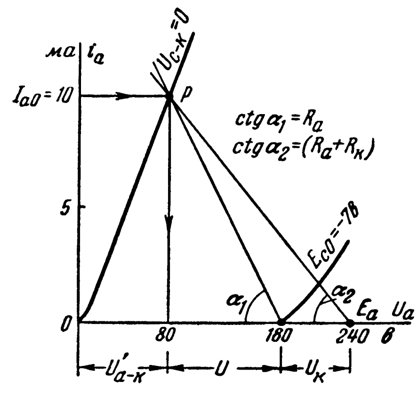


Рис. 38. Выбор режима работы ламп спускового устройства с анодно-сеточными связями (к расчетному примеру 1).

Рис. 39. Выбор сопротивлений R и R_c спускового устройства (к расчетному примеру 1).

напряжения $U = 120$ *в* при длительности фронта $t_ф = 3$ *мксек*. Входная емкость нагрузки $C_н = 110$ *пф*. Напряжение источника смещения $E_c = 100$ *в*.

Примерный порядок расчета:

1. Выбираем по соображениям, изложенным на стр. 47-48, схему спускового устройства с катодной связью (рис. 16). Выход устройства—анод второй лампы.

2. Выбираем тип лампы. Для этого вначале подсчитываем емкость $C_п$:

$$C_п = 110 + 5 + 5 = 120 \text{ пф},$$

где $C_{a\text{-}к} = 5$ *пф* и $C_м = 5$ *пф* приняты ориентировочно.

Необходимое значение тока I_{a02} подсчитаем по формуле (14):

$$I_{a02} = 2{,}3 \frac{120 \cdot 120 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot 10^{-6}} = 11 \text{ ма}.$$

Принимаем с запасом $I_{a02} = 12$ *ма*. Такой ток позволяет обеспечить лампа 6Н15П.

3. Определяем величину сопротивления анодной нагрузки R_{a2}:

$$R_{a2} = \frac{120}{12 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ ком}.$$

4. Определяем величину сопротивления $R_к$. Желательно, чтобы величина напряжения U_γ была, по возможности, меньшей. Поэтому напряжение $U_к = I_{a02}R_к$ не должно превышать значительно величины $|E_{c01}|$. Считая, что выполнение соотношения $U_к = 1,5\,|E_{c01}|$ вполне

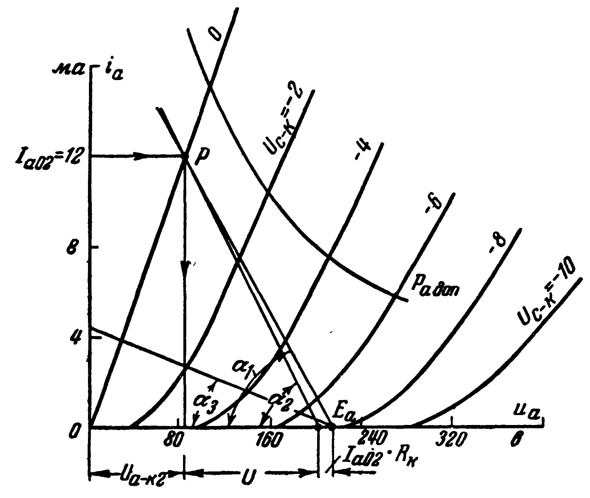


Рис. 40. Выбор режима работы выходной лампы спускового устройства с катодной связью (к расчетному примеру 2).

достаточно для надежного запирания лампы $Л_1$, определим величину сопротивления $R_к$. Поскольку величина E_{c01} неизвестна, так как еще не определено значение напряжения E_a, то зададимся ориентировочно величиной $|E_{c01}| \approx 8$ *в*. Тогда

$$R_к = \frac{1,5\,|E_{c01}|}{I_{a02}} = \frac{1,5 \cdot 8}{12 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ ком}.$$

5. Необходимая величина E_a определится теперь так (рис. 40):

$$E_a = U'_{ак2} + U + I_{a02}R_к \approx 85 + 120 + 12 \approx 220 \text{ в}$$

или как точка пересечения оси абсцисс с линией нагрузки для лампы $Л_2$, проведенной через точку P под углом

$$\alpha_2 = \operatorname{arc\,ctg}\,(R_{a2} + R_к).$$

6. Определяем величину сопротивлений R_1 и R_{c2}.

Для определения значения тока I_{a1} лампы $Л_1$ (6Н15П) зададимся величиной сопротивления $R_{a1} = 51$ *ком.* Проведем нагрузочную прямую (рис. 40) под углом $\alpha_3 = \operatorname{arc\,ctg}\ R_{a1} + R_к$ и построим сеточную динамическую характеристику лампы $Л_1$ (рис. 41). Величина тока I_{a1}

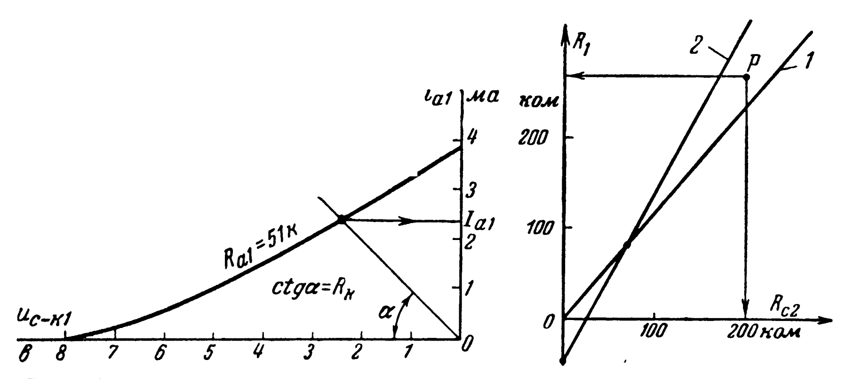


Рис. 41. Определение режима работы первой лампы спускового устройства с катодной связью (к расчетному примеру 2).

Рис. 42. Выбор сопротивлений R_1 и R_{c2} спускового устройства с катодной связью (к расчетному примеру 2).

(2,4 *ма*) определится точкой пересечения линии, проведенной из начала координат под углом $\alpha = \operatorname{arc\,ctg} R_к$, с сеточной динамической характеристикой лампы $Л_1$ (рис. 41).

Так как величины R_{a1} и I_{a1} известны, определим значения сопротивлений R_1 и R_{c2}.

Для того чтобы лампа $Л_2$ была надежно заперта, необходимо выполнить неравенство (29):

$$R_1 > \frac{220 - 2{,}4 \cdot 51 + 8}{100 - 8} R_{c2} = 1{,}175 R_{c2}.$$

Для того чтобы лампа $Л_2$ была надежно отперта, необходимо выполнить неравенство (28):

$$R_1 < \frac{1}{\frac{220 + 100}{220 - 12} - 1} \cdot R_{c2} - 51 = 1{,}85 R_{c2} - 51 \text{ ком.}$$

Заменяя знаки неравенств в последних выражениях на знаки равенств, проведем в системе координат $R_1 - R_{c2}$ прямые *1* и *2*:

$$R_1 = 1{,}175 R_{c2};$$

$$R_1 = 1{,}85 R_{c2} - 51 \text{ ком.}$$

Выбираем рабочую точку (точка P на рис. 42) в середине области возможных значений. При этом получим:

$$R_1 = 270 \text{ ком и } R_{c2} = 200 \text{ ком.}$$

19. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

В заключение кратко рассмотрим методы проектирования спусковых устройств с высокой разрешающей способностью.

Стремление получить предельно малое разрешающее время приводит к такому режиму работы, когда длительность фронта выходного напряжения, период повторения и длительность импульсов запуска становятся величинами одного порядка. В этом случае разрешающее время в значительной степени будет определяться не только постоянной времени выходной цепи, но и режимом работы устройства и режимом запуска.

Каждая схема спускового устройства в этом режиме работы требует учета индивидуальных особенностей переходных процессов, протекающих в ней, учета сеточных токов и т. д. Математический же анализ переходных процессов в спусковых устройствах затруднен из-за большого количества нелинейных зависимостей, вносимых лампами, и большого количества рабочих и паразитных параметров. Даже приближенный метод, основанный на аппроксимации характеристик ламп в виде кусочно-линейных функций и на ряде других допущений, оказался довольно громоздким. Это обстоятельство делает применение такого метода практически нецелесообразным. Поэтому выяснение различных количественных соотношений, необходимых для проектирования спусковых устройств с высокой разрешающей способностью, осуществляется экспериментальным путем.

Однако измерения в экспериментальных исследованиях такого рода затруднены из-за погрешностей, вносимых входными емкостями подключаемых измерительных приборов. Для преодоления этого затруднения прибегают к методу моделирования.

В основе этого метода лежит изменение масштаба времени процессов, протекающих в спусковом устройстве. Величины сопротивлений исследуемого устройства остаются прежними, рабочие и паразитные емкости же модели увеличиваются соответственно масштабу времени $\gamma_т$, равному соотношению разрешающего времени модели и реального устройства.

В модели паразитные емкости представлены сосредоточенными емкостями, которые в $\gamma_т$ раз больше реально существующих. Масштаб времени $\gamma_т$ выбирается таким обра-

зом, чтобы увеличенные паразитные емкости были значительно больше входных емкостей измерительных приборов. При этом влияние измерительных приборов на процессы в устройстве практически устраняется. Обычно масштаб времени выбирается в пределах 100—1 000. Длительность запускающих импульсов должна быть также увеличена в $\gamma_т$ раз.

В результате такого моделирования постоянные времени всех цепей устройства будут увеличены в $\gamma_т$ раз, а скорости переходных процессов уменьшены тем самым в

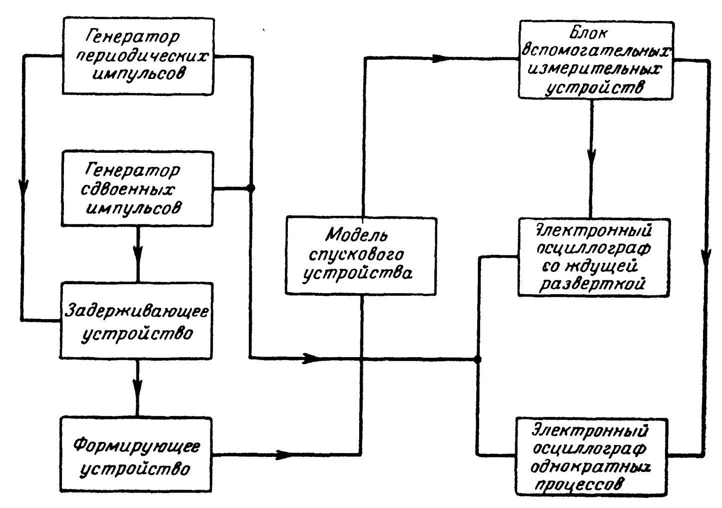


Рис. 43. Блок-схема экспериментальной установки для исследования моделей спусковых устройств.

$\gamma_т$ раз. Соответствие процессов, протекающих в реальном устройстве и модели, зависят от точности определения паразитных емкостей, но даже при приблизительной оценке их удается при помощи модели выяснить необходимые особенности развития переходных процессов в различных вариантах спусковых устройств.

Примерная блок-схема экспериментальной установки для исследования моделей спусковых устройств показана на рис. 43.

Модель спускового устройства собирается на рабочей установке, которая представляет собой приспособление, позволяющее путем простых переключений осуществлять сборку любого варианта модели спускового устройства,

вводить необходимые изменения в схему устройства и присоединять в различные точки схемы измерительные приборы.

Основным измерительным прибором является электронный осциллограф со ждущей разверткой, при помощи которого осуществляется просматривание формы и измерение параметров токов и напряжений в различных цепях устройства за период действия переходных процессов.

Блок вспомогательных устройств состоит из катодных повторителей и измерительных усилителей. Катодные повторители применяются для устранения влияния входных емкостей приборов и соединительных проводов.

Для измерения токов в исследуемую цепь модели включается небольшое сопротивление такой величины (обычно порядка 10—100 *ом*), чтобы оно не оказывало практического влияния на работу модели. С этого сопротивления снимается напряжение (которое пропорционально току, протекающему через него) и подается на измерительный усилитель. После достаточного усиления такого напряжения его можно исследовать при помощи осциллографа.

В том случае, когда нет возможности заземлить один из концов такого сопротивления, применяют дифференциальные усилители. Это необходимо, например, при измерении анодных и сеточных токов, так как напряжения на анодах и сетках изменяются относительно «земли» в широких пределах и не представляют собой величин, пропорциональных соответствующим токам.

Генератор периодических импульсов вырабатывает импульсы запуска заданной частоты. Эти импульсы одновременно подаются на запуск ждущей развертки осциллографа и на задерживающее устройство, позволяющее регулировать время задержки. Задержанный импульс запускает формирующее устройство, которое и вырабатывает импульс для запуска модели. Такая схема позволяет просматривать фронты переходных процессов модели. Формирующее устройство должно вырабатывать импульсы разной формы, разной полярности и регулируемой амплитуды, необходимые для выяснения оптимальных режимов запуска модели.

Генератор сдвоенных (парных) импульсов используется при изучении надежности срабатывания устройства и для определения разрешающего времени при непериодических запускающих импульсах. Период следования сдвоенных импульсов (временной интервал между парами импульсов) подбирается бо́льшим времени установления переходных

процессов в модели. Изменяя временной интервал между импульсами в паре, можно определить разрешающее время для такого режима работы. Осциллограф однократных процессов необходим при изучении запуска модели непериодическими импульсами и для выяснения индивидуальных особенностей отдельного срабатывания модели.

В целях получения высоких разрешающих способностей спусковые устройства желательно строить на лампах, обладающих большой крутизной, малыми паразитными емкостями и низким потенциалом запирания. В тех случаях, когда требуется спроектировать спусковое устройство с предельно высокой разрешающей способностью, применяются пентоды. Наиболее подходящими типами ламп следует считать пентоды 6П9, 6Ж3П и 6Ж4. Применение триодов допустимо, когда не требуется предельно малое разрешающее время. В этих случаях обычно применяются триоды 6Н7С, 6Н8С и 6Н15П.

Следует отметить, что применение специальных полупроводниковых триодов, бессеточных ламп и ламп с вторичной эмиссией позволяет повысить разрешающую способность спусковых устройств до частот 5—10 *Мгц*.

СОДЕРЖАНИЕ


Цена 1 р. 90 к.